

Dwi Satya Palupi    Suharyanto    Karyono



# FISIKA

untuk SMA dan MA Kelas XI



Jilid

2



Pusat Perbukuan  
Departemen Pendidikan Nasional

Dwi Satya Palupi    Suharyanto    Karyono

# **FISIKA**

**untuk SMA dan MA Kelas XI**



**Jilid**

**2**



**Pusat Perbukuan**  
Departemen Pendidikan Nasional



Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi Undang undang

## FISIKA

Untuk Kelas XI SMA dan MA

Penyusun : Dwi Satya Palupi  
Suharyanto  
Karyono  
Desain Sampul : Uzi Sulistyo Adhi  
Layout : Atit Wulandari  
Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

530.07

DWI  
f

DWI Satya Palupi

Fisika : untuk SMA dan MA Kelas XI / penulis; Suharyanto, Karyono,  
— Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.  
vi, 330 hlm, : illus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 315

Indeks

ISBN 978-979-068-802-5 (nomor jilid lengkap)

ISBN 978-979-068-809-4

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul

II. Suharyanto III. Karyono

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional  
dari Penerbit CV. Sahabat

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan  
Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2009

Diperbanyak oleh ...

## Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 200, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009

Kepala Pusat Perbukuan



# Kata Pengantar

Buku Fisika ini disusun untuk membimbing peserta didik SMA/MA agar: (1) membentuk sikap positif terhadap Fisika dengan menyadari keteraturan dan keindahan alam serta mengagungkan kebesaran Tuhan Yang Maha Esa, (2) memupuk sikap ilmiah yaitu jujur, obyektif, terbuka, ulet, kritis, dan dapat bekerja sama dengan orang lain, (3) mengembangkan pengalaman untuk dapat merumuskan masalah, mengajukan dan menguji hipotesis melalui percobaan, merancang dan merakit instrumen percobaan, mengumpulkan, mengolah, dan menafsirkan data, serta mengkomunikasikan hasil percobaan secara lisan dan tertulis, (4) mengembangkan kemampuan bernalar dan berpikir analisis induktif dan deduktif dengan menggunakan konsep dan prinsip fisika untuk menjelaskan berbagai peristiwa alam dan penyelesaian masalah baik secara kualitatif maupun kuantitatif, dan (5) menguasai konsep dan prinsip Fisika serta mempunyai keterampilan mengembangkan pengetahuan, dan sikap percaya diri sebagai bekal untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang yang lebih tinggi serta mengembangkan Ilmu pengetahuan dan teknologi.

Cakupan materinya di samping sesuai dengan standar isi pendidikan juga disesuaikan dengan kemampuan siswa. Materi buku ini akurat, mutakhir, mengandung wawasan produktivitas, merangsang keingintahuan siswa, mengembangkan kecakapan hidup, dan kontekstual.

Penyajian materinya mudah dipahami karena bahasa yang digunakan dalam buku ini komunikatif dan interaktif, lugas, runtut, dan sesuai dengan kaidah bahasa Indonesia yang baku. Lebih dari itu, buku ini disajikan secara sistematis, logis, dan seimbang; dan disertai contoh-contoh dan latihan untuk mendorong kecakapan siswa.

Semoga buku ini bermanfaat bagi siswa-siswa SMA/MA untuk mencapai cita-cita luhurnya, yaitu menjadi putra bangsa yang terbaik, unggul, dan mempunyai daya saing secara global di masa datang.

Yogyakarta, Mei 2007

Penyusun

## Daftar Isi

Kata Sambutan .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Daftar Isi .....	v
<b>Bab I Kinematika</b>	
A. Gerak Lurus .....	3
B. Vektor Posisi, Vektor Kecepatan, dan Vektor Percepatan .....	17
C. Gerak Parabola .....	19
D. Gerak Melingkar .....	22
Uji Kompetensi .....	28
<b>Bab II Gravitasi</b>	
A. Hukum Kepler .....	37
B. Gravitasi Newton .....	39
C. Hukum Kepler Menurut Newton .....	45
Uji Kompetensi .....	49
<b>Bab III Elastisitas</b>	
A. Elastisitas .....	55
B. Tegangan dan Regangan .....	56
C. Tegangan Regangan Geser .....	58
D. Hukum Hooke .....	61
E. Osilasi .....	68
Uji Kompetensi .....	74
<b>Bab IV Usaha dan Energi</b>	
A. Usaha .....	83
B. Energi atau Tenaga .....	89
C. Tenaga Potensial Sistem Planet .....	101
D. Sistem Konservatif .....	106
Uji Kompetensi .....	112
<b>Bab V Momentum Linear dan Impuls</b>	
A. Impuls .....	121
B. Momentum Linear .....	122
C. Hukum Kekekalan Momentum Linear .....	126
D. Tumbukan .....	131
Uji Kompetensi .....	143



Uji Kompetensi Akhir Semester 1 .....	148
<b>Bab VI Dinamika Rotasi</b>	
A. Torsi.....	159
B. Pusat Massa .....	165
C. Momen Inersia dan Tenaga Kinetik Rotasi .....	170
D. Hukum Newton II untuk Rotasi .....	177
E. Momentum Sudut .....	182
F. Hukum Kekekalan Momentum Sudut .....	184
G. Gabungan antara Gerak Translasi dan Rotasi .....	186
H. Kesetimbangan .....	192
Uji Kompetensi .....	198
<b>Bab VII Mekanika Fluida</b>	
A. Massa Jenis, Tekanan dalam Fluida .....	207
B. Tegangan Permukaan .....	226
C. Fluida Bergerak .....	231
Uji Kompetensi .....	244
<b>Bab VIII Teori Kinetik Gas</b>	
A. Massa Molekul dan Kerapatan .....	251
B. Persamaan Umum Gas Ideal .....	253
C. Tekanan Gas Ideal Berdasarkan Teori Gas Ideal .....	257
D. Suhu dan Energi Kinetik Rata-rata Molekul Gas Ideal .....	261
E. Prinsip Ekipartisi dan Energi Internal .....	264
Uji Kompetensi .....	271
<b>Bab IX Termodinamika</b>	
A. Usaha .....	277
B. Hukum Pertama Termodinamika .....	282
C. Kapasitas Kalor Gas .....	284
D. Hukum Termodinamika Kedua dan Siklus Carnot .....	286
E. Entropi .....	295
Uji Kompetensi .....	301
Uji Kompetensi Akhir Semester 2 .....	306
<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>315</b>
<b>Lampiran .....</b>	<b>316</b>

# Bab I

## Kinematika

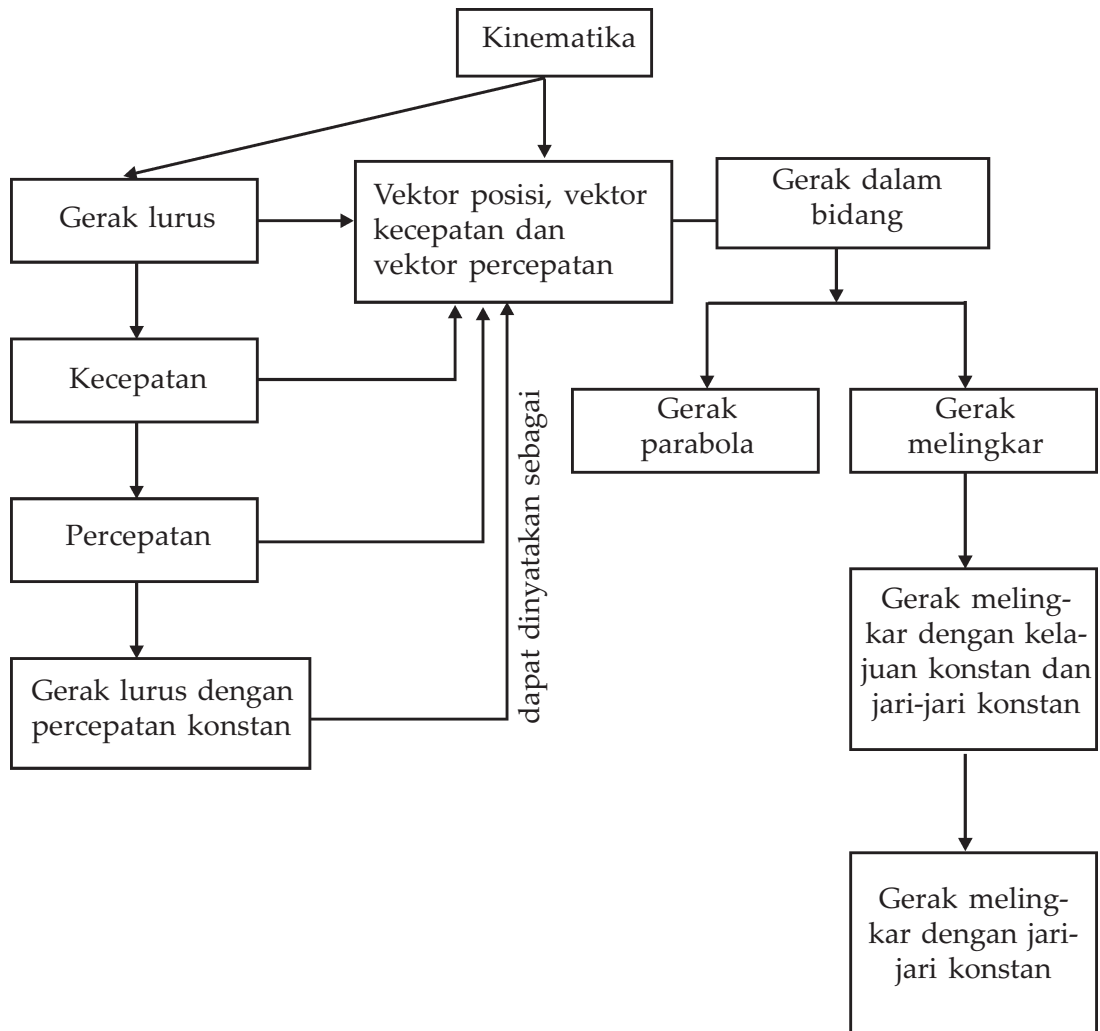


Sumber : Internet : <http://red.freekick.org>.

*Gerak bola pada tendangan bebas ini membentuk lintasan parabola agar menghasilkan gol. Penendang bola harus mempertimbangkan kekuatan tendangan, arah angin, dan tinggi bola.*



# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu menggunakan vektor untuk menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola.



## Motivasi Belajar

Pernahkah kalian memerhatikan sebuah mobil yang berjalan, seorang anak yang berlari, kereta yang berjalan, bola yang melayang karena ditendang, dan benda-benda yang sedang bergerak lainnya? Kalian tentu sering melihat begitu banyak benda yang bergerak di sekitar kalian. Bagaimana bentuk gerak benda-benda tersebut? Bagaimana pula persamaan geraknya? Kalian akan lebih memahami mendapatkan jawabannya dengan mempelajari bab ini.



## Kata-kata Kunci

gerak, kecepatan, kelajuan, perpindahan, vektor

Salah satu cabang ilmu dalam Fisika yang mempelajari tentang gerak adalah kinematika. Pada cabang ilmu ini kita akan mempelajari gerakan benda, apakah geraknya lurus, atau melingkar, atau mungkin membentuk lintasan yang lain seperti parabola. Kita juga akan mempelajari perubahan gerak benda. Perubahan gerakan benda menunjukkan adanya percepatan. Bagaimanakah percepatan yang dialami oleh sebuah bola yang melayang karena ditendang oleh seorang pemain sepak bola? Bagaimana juga dengan buah kelapa yang jatuh dari atas pohonnya, samakah kecepatannya setiap saat?

Tahukah kalian bagaimana gerakan pesawat yang terbang di permukaan bumi? Apakah bergerak lurus, ataukah bergerak melingkar beraturan? Seperti apakah gerak melingkar?

## A. Gerak Lurus

Gerak lurus yaitu gerak yang lintasannya merupakan garis lurus. Kita dapat menganggap gerak lurus ini hanya bergerak pada satu dimensi atau pada satu arah saja, karena hanya satu arah, tanda vektor dapat hilang. Karena hanya satu arah, tanda vektor dapat dihilangkan. Dalam gerak lurus, kita akan mengenal istilah kecepatan, kelajuan, kecepatan rata-rata, dan percepatan.



# 1. Kecepatan dan Kelajuan



Sumber : Penerbit

**Gambar 1.1** Kendaraan berhenti waktu ada palang KA

Kendaraan yang berjalan di jalan raya dapat bergerak dengan kecepatan tetap apabila tidak ada hambatan selama perjalanan. Akan tetapi, kendaraan tersebut harus mengurangi kecepatan bahkan berhenti karena terhalang pintu kereta api atau lampu lalu lintas.

## a. Kelajuan Rata-Rata

Sebuah bus bergerak dengan kelajuan rata-rata 40 km per jam, artinya dalam waktu satu jam bus bergerak menempuh jarak 40 km. Jadi, kelajuan bus adalah :

$$\text{Kelajuan rata - rata} = \frac{\text{jarak total}}{\text{waktu total}} \quad \dots (1)$$

Apabila sebuah bus bergerak dengan kecepatan rata-rata 40 km/jam, maka dalam waktu 1 jam bus menempuh jarak 40 km/jam. Mungkin bus selalu bergerak dengan kelajuan tetap sebesar 40 km/jam. Mungkin juga bus mula-mula bergerak dengan kelajuan 40 km per jam selama setengah jam, lalu bus berhenti karena sang sopir hendak makan, lalu bus bergerak lagi dengan kecepatan 80 km/jam selama setengah jam. Total jarak yang ditempuh bus tetap 40 km selama 1 jam. Dengan demikian, kelajuan rata-rata tidak bisa menggambarkan gerakan setiap saat. Begitu juga dengan kecepatan rata-rata. Kecepatan rata-rata didefinisikan sebagai:

$$\text{Kecepatan rata - rata} = \frac{\text{perpindahan}}{\text{waktu}} \quad \dots (2)$$

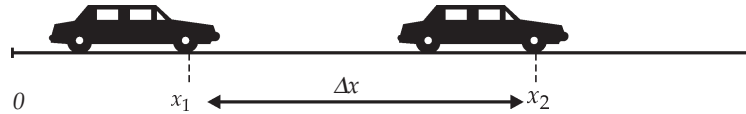
Satuan kelajuan dalam standar internasional (SI) adalah m/detik. Dalam kehidupan sehari-hari sering digunakan satuan km/jam.

Apa perbedaan antara kecepatan rata-rata dengan kelajuan rata-rata? Perbedaan antara kecepatan rata-rata dan kelajuan rata-rata bukan sekadar perbedaan antara besaran vektor dan besaran skalar saja. Kecepatan rata-rata merupakan besaran vektor karena perpindahan adalah perubahan posisi. Kita ambil gerak pada arah sumbu  $x$ . Jika posisi mula-mula adalah

$x_1$  dan posisi selanjutnya adalah  $x_2$  maka perpindahannya:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad \dots (3)$$

Perpindahan bisa positif atau negatif tergantung besar  $x_1$  dan  $x_2$ .



**Gambar 1.2** Posisi mobil bergerak dari titik  $x_1$  ke titik  $x_2$ , perpindahannya  $x_2 - x_1$

Jika  $x_2 > x_1$  maka gerakan positif atau ke kanan, jika  $x_2 < x_1$  maka gerakan ke kiri.



### Contoh Soal 1

Seorang anak pergi ke toko dengan menggunakan sepeda. Semula, dalam waktu 4 menit ia dapat menempuh jarak 150 meter. Ternyata dia lupa membawa uangnya sehingga dia kembali ke rumah dalam waktu 2 menit. Di rumah dia mencari dompetnya selama 5 menit. Kemudian dia berangkat lagi ke toko yang berjarak 500 meter dalam waktu 9 menit. Berapa kecepatan rata-rata anak itu?

Berapa kelajuan rata-rata anak itu?

**Penyelesaian :**

Jika rumah anak diberi posisi nol maka posisi toko pada  $x = 500$  m. Perpindahan posisi anak itu adalah  $x_2 - x_1 = 500$  m. Untuk mencari kecepatan rata-rata, kita hanya melihat posisi awal dan akhirnya saja tanpa melihat bagaimana dia menempuh jarak itu.

Waktu yang diperlukan:

4 menit + 2 menit + 5 menit + 9 menit = 20 menit.

Kecepatan rata-rata anak itu:

$$\vec{v}_{rata-rata} = \frac{500 \text{ meter}}{20 \text{ meter}} = 25 \text{ m/menit}$$

Jadi, kecepatan rata-rata anak itu 25 m/menit atau dalam Standar Internasional (SI) 0,42 m/detik.



Jarak total yang ditempuh anak itu adalah  $150 + 150 + 500 = 800$  meter. Waktu yang diperlukan anak itu adalah 20 menit. Jadi, kelajuan anak itu adalah 40 m/menit atau 0,67 m/detik.

Kecepatan rata-rata berbeda dengan rata-rata kecepatan karena waktu selama gerakan berbeda. Pada contoh 1, kecepatan rata-rata anak ketika berangkat adalah  $150/4$  menit = 0,625 m/detik, kecepatan saat kembali ke rumah adalah  $-150/2$  menit = -1,25 m/detik, kecepatan rata-rata anak itu saat berangkat kembali ke toko adalah 1,39 m/detik. Rata-rata ketiga kecepatan itu

$$= \frac{0,625 \text{ m/det} + (-1,25) \text{ m/det} + 1,39 \text{ m/det}}{3}$$

$$= 0,255 \text{ m/det}$$



## Contoh Soal 2

Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan rata-rata 30 km/jam. Berapakah jarak yang ditempuh oleh mobil selama 10 menit?

**Penyelesaian :**

Perpindahan yang dialami mobil adalah  $\Delta x = v_{rata-rata} t$

$$\Delta x = \frac{30 \text{ km}}{1 \text{ jam}} \times 10 \text{ menit}$$

$$= \frac{30.000 \text{ m}}{1 \text{ jam}} \times \frac{1 \text{ jam}}{3.600 \text{ detik}} \times 10 \times 60 \text{ detik}$$

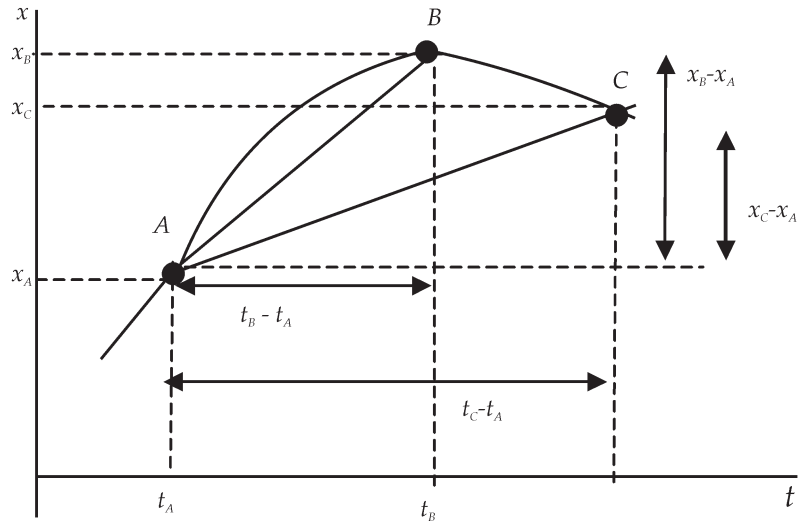
$$= 5.000 \text{ meter}$$

Jadi, selama 10 menit, mobil berpindah sejauh 5000 meter atau 5 km.

## Soal Latihan

Sebuah kapal boat bergerak dengan kecepatan rata-rata 10 m/det. Berapakah perpindahan yang ditempuh selama 5 detik?

Apabila perpindahan dinyatakan dalam grafik  $x$  fungsi waktu, maka kecepatan rata-rata adalah kemiringan dari garis lurus yang ditarik dari titik awal sampai titik akhirnya. Kita bisa melihatnya pada Gambar 1.3.



**Gambar 1.3** Posisi sebagai fungsi waktu. Benda bergerak dari titik A ke titik C melalui titik B. Kecepatan rata-rata dari A sampai B adalah kemiringan garis lurus AB, dan kecepatan rata-rata dari A sampai C adalah kemiringan garis AC.

Kecepatan rata-rata adalah kemiringan garis lurus yang ditarik dari titik awal sampai titik yang dituju. Bila kita mencari kecepatan rata-rata dari A sampai B maka kecepatan rata-ratanya kemiringan garis AB

$$v_{rata-rata} = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} \quad \dots \quad (4)$$

Kecepatan rata-rata dari titik A ke titik C, kemiringan garis AC.

$$v_{rata-rata} = \frac{x_C - x_A}{t_C - t_A} \quad \dots \quad (5)$$

### b. Kecepatan Sesaat

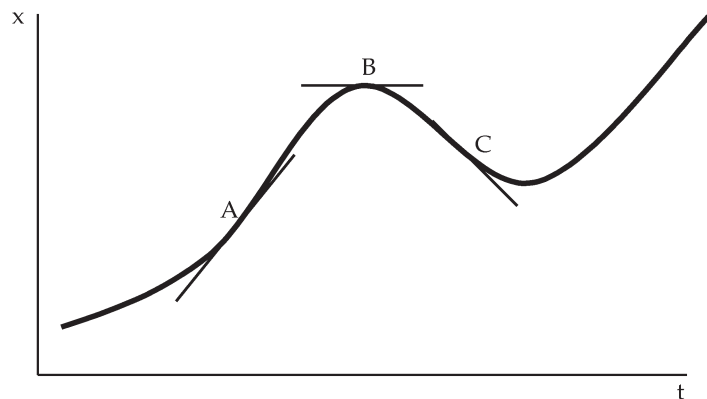
Kecepatan sesaat kita definisikan sebagai:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Limit  $\Delta t \rightarrow 0$  merupakan turunan  $x$  terhadap  $t$  sehingga dapat kita tuliskan:

$$v(t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{dx}{dt} \quad \dots (6)$$

Besar kecepatan sesaat adalah kelajuan sesaat. Kecepatan sesaat pada  $t$  tertentu dapat kita cari dari grafik posisi dengan waktu. Kecepatan sesaat merupakan gradien garis singgung di titik yang hendak kita cari kecepatan sesaatnya. Kecepatan sesaat di titik B adalah gradien garis singgung di titik B. Kecepatan sesaat di titik C adalah gradien garis singgung di titik C. Kemiringan dapat bernilai positif atau negatif.



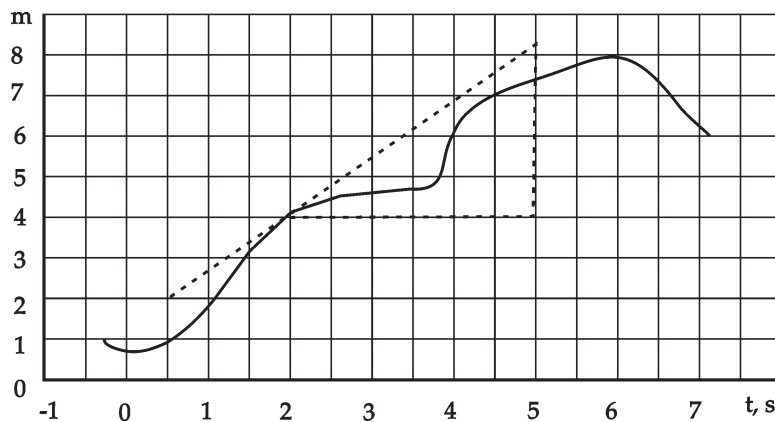
**Gambar 1.4** Kecepatan sesaat adalah kemiringan garis singgung kurva di titik yang hendak dicari kecepatan sesaatnya. Kecepatan sesaat di titik A adalah kemiringan garis singgung di titik A. Kecepatan sesaat di titik B adalah kemiringan garis singgung di B, kecepatan sesaat di titik C adalah kemiringan garis singgung di titik C.



### Contoh Soal 3

Bila posisi sebuah partikel ditunjukkan grafik di bawah ini. Carilah kecepatan sesaat dan kecepatan rata-rata partikel saat  $t = 2$ . Di mana kecepataannya paling besar? Pernahkah kecepataannya negatif?





(gambar diambil dari Tipler, Fisika 1)

### Penyelesaian :

Kecepatan sesaat:

Kita bisa mencari kecepatan sesaat pada saat  $t = 2$  dengan mencari gradien garis singgung pada titik tersebut. Garis singgung pada saat  $t = 2$  telah ditunjukkan pada grafik. Kita bisa menghitung gradien dengan mengambil titik (2;4) dan titik (5;8,5).

$$\text{gradien} = \frac{8,5 - 4}{5 - 2} = \frac{4,5}{3} = 1,5$$

Jadi, kecepatan sesaat saat  $t = 2$  adalah 1,5 m/detik.

Kecepatan yang terbesar adalah saat kemiringan garis singgung paling besar. Grafik menunjukkan kemiringan garis singgung terbesar dicapai saat  $t = 4$ .

Kecepatan akan bernilai negatif bila kemiringan garis singgung bernilai negatif. Pada grafik tampak kemiringan negatif adalah saat  $t > 6$ .

## 2. Percepatan

Bila kecepatan sesaat benda berubah dengan berjalannya waktu, partikel dikatakan dipercepat. Partikel memiliki percepatan bila dalam selang waktu  $\Delta t = t_2 - t_1$  kecepatan sesaat partikel berubah dari  $v_1$  menjadi  $v_2$ , percepatan rata-rata partikel  $a_{rata-rata}$  didefinisikan sebagai:

$$a_{rata-rata} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \dots (6)$$

Percepatan memiliki satuan  $\text{m/detik}^2$ , dan dimensinya panjang/(waktu)<sup>2</sup>.

Apabila suatu partikel yang semula diam, dan memiliki percepatan  $2 \text{ m/det}^2$ , kita dapat mengatakan tiap detik kecepatan partikel bertambah sebesar  $2 \text{ m/det}$ . Saat  $t = 0$  kecepatan partikelnya adalah 0 karena partikel semula diam. Satu detik kemudian atau saat  $t = 1$  kecepatan partikel sudah bertambah  $2 \text{ m/detik}$  atau kecepatannya menjadi  $2 \text{ m/det}$ . Satu detik kemudian atau saat  $t = 2$  maka kecepatan partikel bertambah sebesar  $2 \text{ m/detik}$ , atau kecepatannya sekarang  $4 \text{ m/det}$  demikian seterusnya.

Percepatan sesaat didefinisikan sebagai:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \dots (7)$$

Percepatan sesaat saat  $t$  detik merupakan kemiringan garis singgung grafik  $v$  dengan  $t$  pada saat  $t$ .

Percepatan merupakan turunan dari kecepatan sesaat. Kecepatan sesaat merupakan turunan dari posisi setiap saat, dengan demikian percepatan adalah turunan kedua dari posisi.

$$a(x) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \dots (8)$$



### Keingintahuan : Mencari Informasi

Apakah perbedaan antara kecepatan dan percepatan? Berilah contohnya!



### Contoh Soal 4

Sebuah partikel memiliki posisi sebagai fungsi waktu

$$x = 5 \left( \frac{\text{m}}{\text{det}^3} \right) t^3 + 2 \left( \frac{\text{m}}{\text{det}} \right) t.$$

Carilah kecepatan dan percepatannya sebagai fungsi waktu. Berapakah kecepatannya saat  $t = 2$  ?

**Penyelesaian :**

Kecepatan sebagai fungsi waktu adalah:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d(5t^3 + 2t)}{dt} = 15t^2 + 2$$

Kecepatan saat  $t = 2$  adalah  $15(2)^2 + 2 = 62$  m.

Percepatan sebagai fungsi waktu adalah:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(15t^2 + 2t)}{dt} = 30t$$

Percepatan saat  $t = 2$  adalah  $a = 30.(2) = 60$  m/det<sup>2</sup>.

### Soal Latihan

Sebuah partikel bergerak dengan persamaan gerak sebagai fungsi waktu :  $S = 5t^2 + 6t + 3$ .

Carilah kecepatan dan percepatannya fungsi waktu! Berapakah percepatan dan kecepatannya pada  $t = 1s, 2s$ , dan  $3s$ ?

## 3. Gerak Lurus dengan Percepatan Konstan

Suatu partikel yang bergerak dengan percepatan konstan memiliki pertambahan kecepatan yang konstan, atau pertambahan kecepatan linear terhadap waktu. Apabila mula-mula saat  $t = 0$  partikel bergerak dengan kecepatan  $v_0$ , setelah  $t$  detik kecepatannya bertambah sebesar  $at$ . Kecepatannya setiap saat menjadi:

$$v_t = v_0 + at \quad \dots (9)$$

Partikel yang memiliki percepatan konstan kecepatan rata-rata partikel merupakan nilai tengah kecepatan awal dan kecepatan akhir. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 1.5 (b). Apabila kecepatan mula-mula adalah  $v_0$  dan kecepatan akhirnya  $v_t$  kecepatan rata-ratanya adalah:

$$v_{rata-rata} = \frac{v_0 + v_t}{2} \quad \dots (10)$$



Perpindahannya adalah:

$$\Delta x = v_{\text{rata-rata}} t = \frac{v_0 + v}{2} t$$

$$\Delta x = \frac{v_0 + (v_0 + at)}{2} t = v_0 t + a \frac{1}{2} t^2$$

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad \dots (11)$$

Grafik posisi sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada Gambar (1.4c) Pada umumnya diambil  $t = 0$  pada saat mula-mula, dengan  $x_0 = 0$  atau partikel mulai di  $x = 0$ .

Persamaan (11) bisa kita nyatakan dalam bentuk lain.

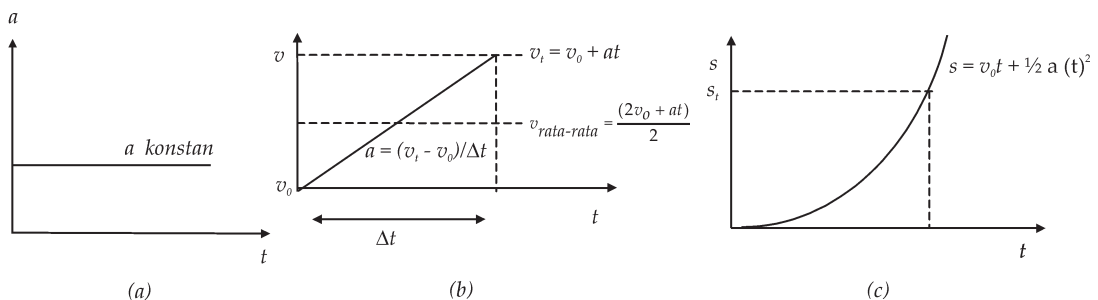
Persamaan (9) bisa kita ubah menjadi berbentuk  $t = \frac{v - v_0}{a}$

Kemudian jika  $t$  tersebut kita masukkan ke persamaan (11) maka kita peroleh:

$$x - x_0 = v_0 \frac{v - v_0}{a} + \frac{1}{2} \left( \frac{v - v_0}{a} \right)^2$$

$$a \Delta x = v_0 (v - v_0) + \frac{1}{2a} (v - v_0)^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x \quad \dots (12)$$



**Gambar. 1.5** (a) Grafik percepatan sebagai fungsi waktu untuk percepatan konstan. (b) Percepatan merupakan kemiringan grafik kecepatan sebagai fungsi waktu. (c) Grafik fungsi posisi sebagai fungsi waktu.



### Contoh Soal 5

Sebuah partikel bergerak dengan percepatan  $4 \text{ m/det}^2$ . Apabila semula kecepatan partikel  $2 \text{ m/det}$ . Berapa kecepatan partikel setelah 5 detik? Di mana posisi partikel bila partikel semula berada di  $x = 2 \text{ m}$ ?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$a = 4 \text{ m/det}^2, \quad v_0 = 2 \text{ m/det}, \quad t = 5 \text{ det}, \quad x_0 = 2 \text{ m}$$

*Jawab :*

Posisi partikel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (11) dengan nilai-nilai di atas.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\ &= 2 + 2.5 + \frac{1}{2} . 4 . 5^2 \\ &= 62 \text{ m} \end{aligned}$$



### Contoh Soal 6



Sebuah bola dilemparkan ke atas dengan kecepatan awal  $20 \text{ m/det}$ . Bola mendapat percepatan gravitasi arahnya ke bawah. Berapakah tinggi maksimal bola? Berapa kecepatan bola saat mencapai tinggi maksimal? Berapa waktu yang diperlukan untuk mencapai titik tertingginya?

**Penyelesaian :**

Bola mendapat percepatan dari gravitasi bumi arahnya ke bawah maka  $a$  bernilai negatif

$$a = -10 \text{ m/det}^2, \quad v_0 = 20 \text{ m/det}.$$

Apabila dinyatakan dengan koordinat, arah ke atas adalah arah sumbu  $y$  (+) dan arah ke bawah adalah sumbu  $y$  (-), dengan demikian percepatan gravitasi arahnya  $-g$  karena arahnya ke bawah. Kecepatan ke atas bernilai positif dan kecepatan ke bawah bernilai negatif.

Bola bergerak ke atas dan mendapat percepatan ke bawah sehingga bola makin lama makin lambat dan pada suatu saat akan berhenti. Kemudian bola turun dan semakin lama semakin cepat.

Saat naik : dengan menggunakan persamaan (12)

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$0 = (20 \text{ m/det})^2 + 2 (-10)x$$

$$x = 20 \text{ m}$$

Waktu yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan (9)

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{(0) - (20)}{-10} = 2$$

Waktu yang diperlukan 2 detik.

Saat bola turun ke bawah maka  $v_0 = 0$ . Jarak yang ditempuh 20 m maka kita bisa mencari kecepatan saat sampai di tanah

$$v^2 = 0 + -2 (10) (-20) = 400$$

$$v = 20 \text{ m/det}$$

Kecepatan akhir  $-20 \text{ m/det}$  karena arahnya ke bawah atau ke arah sumbu  $y$  negatif. Waktu untuk sampai ke tanah

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{(-20) - (0)}{-10} = 2 \text{ detik}$$

Tampak waktu yang diperlukan untuk naik sama dengan waktu yang digunakan untuk turun.



### Contoh Soal 7

Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan  $20 \text{ m/detik}$ . Di depan mobil lewat seekor ular sehingga sopir mobil memutuskan untuk mengerem sampai berhenti. Jika percepatannya  $-5 \text{ m/det}^2$ , berapakah jarak yang ditempuh mobil mulai saat rem ditekan sampai mobil berhenti?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$v_0 = 20 \text{ m/det} \quad a = -5 \text{ m/det}^2,$$

*Jawab :*

Kita bisa mencari jarak yang ditempuh mobil mulai saat mobil direm. Percepatan bernilai  $(-)$  atau berupa perlambatan karena mobil direm atau



kecepatannya makin lama makin kecil. Dengan menggunakan persamaan (9)

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{(0) - (20)}{-5} = 4 \text{ detik}$$

Jarak yang ditempuh

$$0 = 20^2 + 2(-5)x$$

$$x = 40 \text{ m}$$

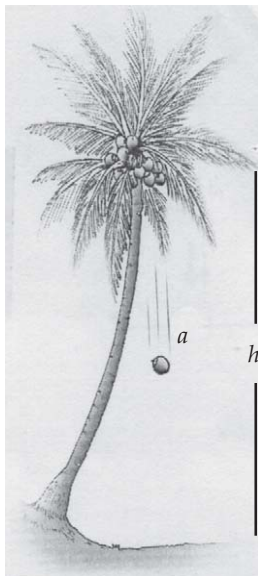
Mobil akan berhenti 4 detik dari saat pengemudi menginjak rem dan menempuh 40 m sebelum berhenti.

### Soal Latihan

Seorang anak menaiki sebuah sepeda dengan kecepatan 5 m/det. Tiba-tiba ia melihat sebuah boneka tergeletak di jalan. Anak itu bermaksud mengambil boneka itu untuk dikembalikan kepada gadis kecil yang memiliki boneka itu. Bila anak itu mengerem dengan percepatan  $-0,5 \text{ m/det}^2$ , berapa jarak yang ditempuhnya sampai dia berhenti?



### Contoh Soal 8



Sebuah kelapa jatuh dari pohonnya. Kelapa mendapat percepatan gravitasi bumi sebesar  $10 \text{ m/det}^2$  ke arah bumi. Bila ketinggian pohon 10 meter, berapakah kecepatan partikel saat sampai di permukaan tanah?

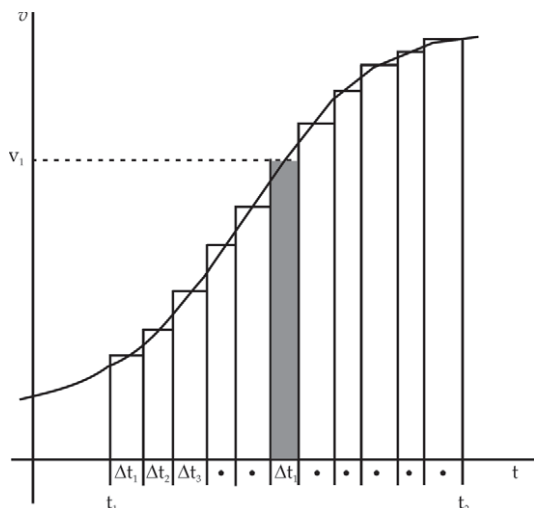
#### Penyelesaian :

Bila Permukaan tanah kita anggap  $x = 0$  maka  $\Delta x = 10 \text{ m}$ ,  $a = 10 \text{ m/det}^2$ ,  $v_0 = 0$ .

Dengan menggunakan Persamaan (12) kita bisa menghitung kecepatan kelapa.

Kecepatan saat sampai permukaan tanah adalah  $20 \text{ m/det}$ .

Salah satu contoh gerak dengan percepatan konstan adalah gerak jatuh bebas. Sebuah benda atau partikel yang berada pada ketinggian tertentu mula-mula diam lalu dijatuhkan, benda bergerak ke bawah karena mendapat percepatan gravitasi sebesar  $g$  ke arah bawah. Seperti yang ditunjukkan pada contoh (6).



Dari Persamaan (12) kita dapat memperoleh kecepatan benda setelah sampai di permukaan tanah adalah

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$v^2 = 0 - 2g\Delta x$$

Kecepatan mula-mula adalah nol karena benda diam, bila posisi awal di atas permukaan tanah setinggi  $h$  dan posisi akhir di permukaan tanah, maka

$$\Delta x = 0 - h = -h \text{ sehingga } v^2 = 2gh$$

Bagaimana bila sebuah partikel bergerak dengan percepatan tidak konstan tetapi merupakan fungsi waktu, sehingga kecepatannya juga fungsi waktu. Kita bisa mencari posisinya dengan menghitung luasan yang dibentuk oleh fungsi kecepatan dan sumbu  $t$ . Luasan di bawah fungsi  $v$  sampai  $t$  tertentu adalah posisi saat  $t$  tertentu tersebut berada. Luasan di bawah kurva bisa kita bagi menjadi  $N$  persegi panjang dengan lebar  $\Delta t$  dan tinggi  $v(t)$ , lebar  $\Delta t$  adalah  $=(t_2-t_1)/N$ , jika  $\Delta t$  sangat kecil maka jumlahan dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum v_i \Delta t_i = \int v dt$$

Begitu juga mencari kecepatan dari suatu fungsi  $a(t)$ . Jika kita mengetahui grafik fungsi  $a(t)$  sebagai fungsi waktu maka kecepatan adalah luasan di bawah fungsi  $a$  dengan fungsi  $t$ .



### Life Skills : Kecakapan Vokasional

Kalian telah mempelajari gerak lurus dengan percepatan konstan. Lakukan kegiatan mekanik untuk bisnis yang mempelajari pengetahuan tersebut! Jika mengalami kesulitan karena sendirian, bergabunglah dengan beberapa teman. Konsultasilah kepada guru kalian!

## B. Vektor Posisi, Vektor Kecepatan, dan Vektor Percepatan

Pernakah kalian mengamati speedometer sepeda motor? Apa yang tercatat pada speedometer? Kalian akan melihat jarum speedometer menunjukkan kelajuan sesaat sepeda motor. Bagaimana dengan arahnya? Jika pada speedometer dilengkapi dengan kompas penunjuk arah maka kalian akan bisa mengetahui arah kecepatan. Vektor kecepatan sesaat merupakan vektor yang menunjukkan arah gerakan dan besarnya adalah sama dengan nilai kelajuan. Vektor kecepatan sama dengan laju perubahan vektor perpindahan. Sekarang kita akan menyatakan kecepatan, percepatan sebagai vektor.

Mari kita tinjau sebuah partikel mula-mula berada pada posisi  $\vec{r}_1 = x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j} + z_1 \hat{k}$ . Partikel bergerak selama  $\Delta t$  sehingga posisinya menjadi  $\vec{r}_2 = x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j} + z_2 \hat{k}$

maka vektor perpindahan partikel tersebut adalah:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (x_2 - x_1) \hat{i} + (y_2 - y_1) \hat{j} + (z_2 - z_1) \hat{k}$$

vektor perpindahan merupakan perubahan vektor posisi.

Vektor kecepatan rata-rata partikel tersebut selama  $\Delta t$  adalah:

$$\vec{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\Delta t} = \frac{(x_2 - x_1)}{\Delta t} \hat{i} + \frac{(y_2 - y_1)}{\Delta t} \hat{j} + \frac{(z_2 - z_1)}{\Delta t} \hat{k}$$

Vektor kecepatan sesaat partikel tersebut adalah

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(x_2 - x_1)}{\Delta t} \hat{i} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(y_2 - y_1)}{\Delta t} \hat{j} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(z_2 - z_1)}{\Delta t} \hat{k}$$

atau bisa juga kita nyatakan sebagai:

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j} + \frac{dz}{dt} \hat{k} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$$

Besar vektor kecepatan pada saat  $t$  adalah  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$

Vektor kecepatan partikel mungkin berubah-ubah, maka partikel tersebut memiliki vektor percepatan. Vektor



kecepatan dikatakan berubah jika besar vektor tersebut berubah atau besar vektor tetap tetapi arah kecepatannya berubah, atau baik besar maupun arah vektor kecepatan berubah. Vektor percepatan sesaat partikel adalah:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(v_{x2} - v_{x1})}{\Delta t} \hat{i} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(v_{y2} - v_{y1})}{\Delta t} \hat{j} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(v_{z2} - v_{z1})}{\Delta t} \hat{k}$$

atau dapat juga dinyatakan sebagai

$$\vec{a} = \frac{dv_x}{dt} \hat{i} + \frac{dv_y}{dt} \hat{j} + \frac{dv_z}{dt} \hat{k} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} + a_z \hat{k}$$

Besar percepatan setiap saat adalah  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$



### Contoh Soal 9

Kapal Rinjani berlayar mula-mula berada pada posisi (150,100) dalam meter. Sepuluh menit kemudian kapal itu berada pada posisi (250,500). Berapakah komponen kecepatan rata-rata, besar kecepatan rata-rata dan arah Kapal Rinjani?

**Penyelesaian :**

Kecepatan rata-rata Kapal Rinjani adalah:

$$\vec{v}_{rata-rata} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\Delta t} = \frac{(250 - 150)}{10} \hat{i} + \frac{(500 - 100)}{10} \hat{j}$$

$$\vec{v}_{rata-rata} = 10\hat{i} + 40\hat{j} \text{ m/det}$$

Komponen kecepatan rata-rata ke arah  $x$  :  $v_x = 10$  m/det

Komponen kecepatan rata-rata ke arah  $y$  :  $v_y = 40$  m/det .

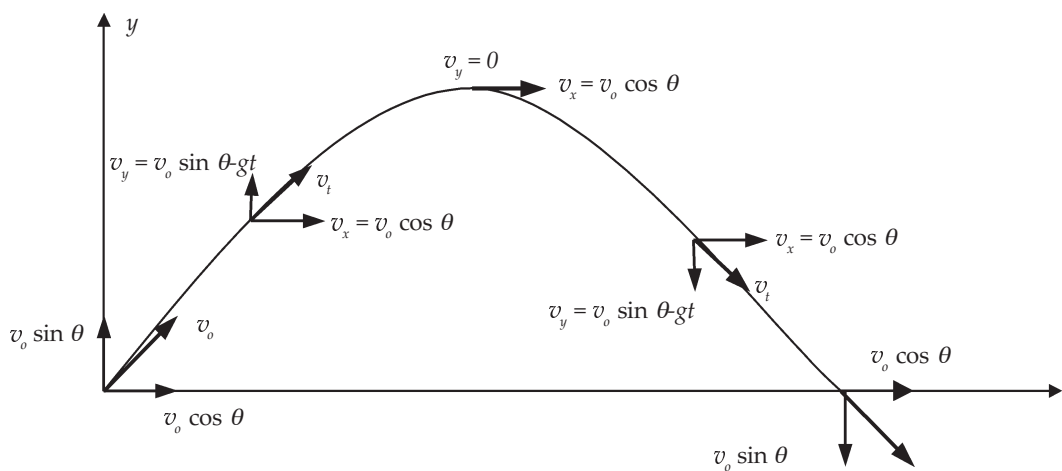
Besar kecepatan rata rata adalah:

$$v = \sqrt{10^2 + 40^2} = 42 \text{ m/det}$$

Arah kecepatan kapal adalah  $\tan \theta = \frac{40}{10} = 4$

## C. Gerak Parabola

Gerak parabola merupakan salah satu contoh gerak pada bidang datar. Pada contoh soal 7, sebuah bola dilemparkan ke atas dengan kecepatan awal tertentu, dan bola mendapat percepatan ke bawah. Percepatan mengurangi kecepatan karena arahnya berlawanan dengan kecepatan mula-mula. Sekarang bagaimana jika bola dilempar miring ke atas membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu horizontal seperti ditunjukkan gambar 1.5.



**Gambar 1.5** Gerak parabola. Bola bergerak ke arah sumbu  $x$  dan juga ke arah sumbu  $y$ . Bola memiliki komponen kecepatan ke arah sumbu  $x$  dan ke arah sumbu  $y$ .

Kita dapat menguraikan vektor kecepatan setiap saat pada sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ . Percepatan yang dialami benda ke arah bawah adalah arah negatif dan arah ke atas arah positif. Arah sumbu  $x$  ke kanan adalah positif, dan arah sumbu  $x$  ke kiri adalah arah negatif. Kita bisa menuliskan percepatan yang dialami benda adalah

Percepatan pada sumbu  $x$ :

$$a_x = 0 \quad \dots (13.a)$$

Karena percepatan ke arah sumbu  $x$  adalah nol maka kecepatan ke arah sumbu  $x$  konstan.

Percepatan pada sumbu  $y$ :

$$a_y = -g \quad \dots (13.b)$$

Kecepatan awal ke arah sumbu  $x$ ,  $v_{ox} = v_o \cos \theta$ . Kecepatan ini konstan setiap saat.

$$v(t) = v_{ox} \quad \dots (14)$$

Kecepatan awal ke arah sumbu  $y$ :

$$v_{oy} = v_o \sin \theta \quad \dots (15)$$

Kecepatan setiap saat pada arah sumbu  $y$ :

$$v(t) = v_{oy} + at = v_o \sin \theta - gt \quad \dots (16)$$

Vektor kecepatan sekarang dapat kita tuliskan sebagai

$$\vec{v}(t) = v_x \hat{i} + v_y \hat{j}$$

$$\vec{v}(t) = (v_o \cos \theta) \hat{i} + (v_o \sin \theta - gt) \hat{j} \quad \dots (17)$$

Besar kecepatan adalah:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \dots (18)$$

Posisi pada sumbu  $x$  adalah:

$$a_x = 0$$

$$v_{ox} = v_o \cos \theta \quad \text{dan} \quad v_t = v_o$$

$$x = x_o + v_o \cos \theta t \quad \dots (19)$$

Posisi pada sumbu  $y$  adalah:

$$y = y_o + v_{oy}t + \frac{1}{2} v_y t^2$$

$$y = y_o + v_o \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (20)$$



### Contoh Soal 10

Sebuah bola dilempar ke atas dengan sudut  $\theta$  terhadap sumbu  $x$ .  
 (a) Berapakah tinggi maksimal yang dapat dicapai bola? (b) Berapa waktu yang diperlukan bola agar mencapai tinggi maksimal? (c) Berapa jarak maksimal yang bisa ditempuh bola?

#### Penyelesaian :

Keadaan awal bola kita anggap mula-mula di  $(0,0)$ .

Saat bola mencapai tinggi maksimal maka kecepatan ke arah sumbu  $y$  bernilai 0, dan kecepatan ke arah sumbu  $x$  konstan yaitu  $v_x = v_o \cos \theta$

Bila tinggi maksimal adalah  $h = y - y_o$ , dan permukaan tanah kita anggap  $x = 0$

Dengan menggunakan persamaan (16)

$$v(t) = v_o \sin \theta - gt$$

$$0 = v_o \sin \theta - gt$$

$$t = \frac{v_o \sin \theta}{g}$$

(a) maka ketinggian maksimal bola adalah:

$$h = v_o \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 = v_o \sin \theta \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right) - \frac{1}{2} g \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)^2$$

$$h = g \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)^2 - \frac{1}{2} g \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)^2 = \frac{1}{2} g \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)^2$$

(b) Waktu yang diperlukan bola untuk sampai di tanah lagi adalah dua kali waktu yang diperlukan agar mencapai ketinggian maksimum,  $t = 2t_{maks}$ .

(c) Jarak maksimum bola adalah:

$$X = v_o \cos \theta \left( \frac{2v_o \sin \theta}{g} \right) = \frac{2v_o^2 \cos \theta \sin \theta}{g} = \frac{v_o^2 \sin 2\theta}{g}$$



### Soal Latihan

Seorang anak melempari mangga di kebunnya. Ketinggian mangga tersebut 3 m. Bagaimanakah caranya agar lemparan anak tersebut mengenai mangga itu bila kecepatan awal anak 10 m/det? (tips : kalian dapat mengatur sudut lemparan dan jarak lemparan)



### Life Skills : Kecakapan Personal

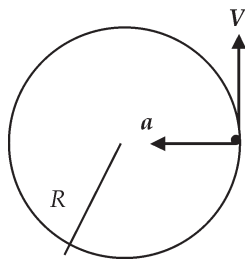
1. Sebutkanlah contoh-contoh benda yang bergerak dengan lintasan berupa parabola.
2. Bila kalian melempar sebuah batu ke atas, bagaimanakah caranya agar lintasan batu bisa berbentuk parabola? Bagaimana cara kalian melempar batu tersebut agar batu menempuh lintasan lurus? Mintalah pada teman kalian untuk mengamati batu yang kalian lemparkan.

## D. Gerak Melingkar

Sebuah partikel selain dapat bergerak lurus juga dapat bergerak melingkar. Kita sering melihat gerak melingkar, contoh gerak-gerak melingkar misalnya gerak roda, mobil bergerak menikung pada belokan, gerak bumi mengelilingi matahari, bulan melingkar mengelilingi matahari, dan sebagainya.

### 1. Gerak Melingkar dengan Kelajuan Konstan dan Jari-Jari Konstan

Mari kita tinjau sebuah partikel bergerak melingkar dengan kelajuan konstan, dengan demikian besar percepatannya nol. Benarkah percepatannya nol? Lihatlah partikel yang bergerak melingkar dengan jari-jari  $R$  dengan kelajuan konstan. Sebuah partikel yang bergerak dengan kelajuan konstan mempunyai arah partikel selalu berubah mengikuti arah lintasan partikel, ini berarti, kecepatan partikel tidak konstan meskipun kelajuan partikel konstan. Kecepatan partikel yang tidak konstan memiliki percepatan. Percepatan yang dialami partikel tidak mengubah kelajuan partikel tetapi mengubah arah gerak partikel. Ke manakah arah dan besar



**Gambar 1.6** Partikel bergerak melingkar dengan jari-jari konstan dan kelajuan konstan. Bila tidak ada percepatan  $a$  yang menuju arah radial partikel akan bergerak lurus dengan kecepatan  $v$ . Percepatan yang diperlukan agar partikel bergerak melingkar dengan percepatan konstan se-

$$\text{besar } a = \frac{v^2}{r}$$

percepatan tersebut? Lihatlah Gambar (1.6) agar partikel tetap bergerak melingkar dengan kelajuan konstan, percepatan partikel harus berarah tegak lurus lintasan partikel atau menuju pusat lingkaran. Besar percepatan yang harus dikerahkan agar partikel tetap melingkar adalah:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Arah percepatan ke arah pusat atau ke arah *radial*. Percepatan tersebut disebut *percepatan sentripetal*.

Partikel yang bergerak melingkar memiliki percepatan sentripetal dan percepatan tangensial. Jika partikel tersebut bergerak melingkar dengan jari-jari konstan dan kelajuan konstan, maka partikel tersebut hanya memiliki percepatan ke arah radial saja, percepatan ke arah tangensial adalah 0. Arah tangensial adalah arah yang tegak lurus dengan arah radial atau arah putaran mengelilingi lingkaran.

Apabila partikel bergerak dengan kelajuan konstan maka partikel hanya memiliki percepatan sentripetal.

## 2. Gerak Melingkar dengan Jari-Jari Konstan

Mari kita tinjau sebuah partikel yang bergerak melingkar dengan jari-jari konstan seperti ditunjukkan pada Gambar (1.7). Apabila mula-mula partikel berada pada titik  $P_o$ , maka setelah  $dt$  detik posisi  $P_o$  bergeser ke  $P'$ . Sudut yang ditempuh partikel adalah  $d\theta$  disebut sebagai perpindahan sudut. Ukuran sudut apabila dinyatakan dalam radian adalah panjang busur  $ds$  dibagi dengan  $r$ .

$$d\theta = \frac{ds}{r} \text{ atau } ds = r d\theta \quad \dots (21)$$

Bila partikel melakukan 1 putaran penuh maka perpindahan sudutnya  $360^\circ$ , sedangkan panjang busur yang ditempuh adalah keliling lingkaran. Kita bisa mendapatkan:

$$1 \text{ putaran penuh} = \Delta\theta = 2\pi r/r \text{ radian}$$

$$1 \text{ putaran penuh} = 360^\circ = 2\pi \text{ radian} \quad \dots (22)$$

Pada gerak melingkar kita akan mengenal kecepatan sudut dan percepatan sudut. Untuk partikel yang bergerak melingkar kecepatan partikel terhadap waktu partikel adalah

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{rd\theta}{dt} \quad \dots \quad (23)$$

$\frac{d\theta}{dt}$  dinamakan kecepatan sudut diberi simbol  $\omega$  atau dapat dituliskan

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \dots \quad (24)$$

Besar kecepatan sudut disebut kelajuan sudut. Biasanya kecepatan sudut bernilai positif jika rotasi berlawanan dengan arah jarum jam dan bernilai negatif jika searah dengan jarum jam. Satuan kecepatan sudut adalah *radian/det*. Hubungan antara kecepatan sudut dan kecepatan linear dapat kita lihat pada persamaan (23) dan (24) sehingga kita dapatkan:

$$v = r\omega \quad \dots \quad (25)$$

Kelajuan partikel bisa konstan namun dapat juga berubah terhadap waktu. Jika kelajuan sudut berubah maka akan terdapat percepatan sudut  $\alpha$  yaitu laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu.

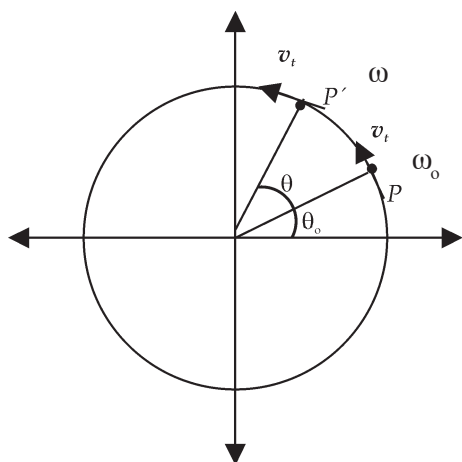
$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \dots \quad (26)$$

Partikel memiliki percepatan linear atau percepatan tangensial  $a_t$  yang arahnya sejajar lintasan partikel.

$$a_t = \frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = r\alpha \quad \dots \quad (27)$$

Sekarang kita mendapatkan hubungan antara percepatan sudut dan percepatan tangensial. Arah kecepatan sudut dan kecepatan linear, percepatan sudut dan percepatan tangensial dapat dilihat pada Gambar (1.7)

Sekarang mari kita tinjau sebuah partikel yang berotasi dengan jari-jari konstan dan percepatan sudut konstan. Kecepatan sudut setiap saat adalah:



**Gambar 1.7** Benda berotasi dengan jari-jari konstan memiliki kecepatan sudut  $\omega$ . Arah kecepatan tangensial dan percepatan tangensial searah dengan lintasan.

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad \dots (28)$$

Seperti pada gerak lurus, karena kecepatan sudut setiap saat konstan, maka kecepatan sudut rata-rata adalah setengah kecepatan akhir dikurangi kecepatan akhir. Oleh karena itu, kita bisa memperoleh perpindahan sudut setiap saat adalah:

$$\theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

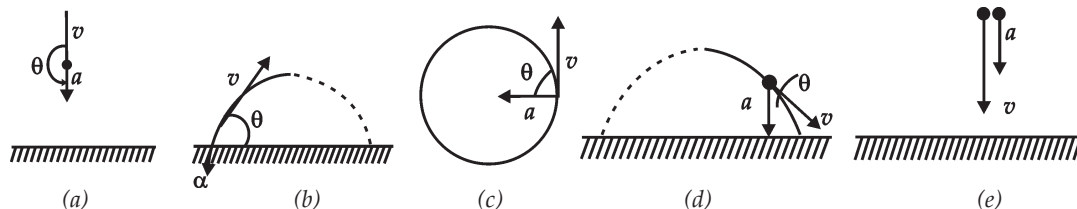
$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \dots (29)$$

Kaitan antara gerak lurus dengan percepatan konstan dan gerak melingkar dengan percepatan sudut konstan bisa kita lihat pada Tabel (1.1).

**Tabel (1.1)** Gerak dengan Percepatan Linear dan Percepatan Sudut Konstan

Gerak lurus (arah tetap)	Gerak melingkar (sumbu tetap)
$v_t = v_0 + at$ $\Delta x = \frac{v_0 + v}{2} t$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $v_t^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$	$\omega_t = \omega_0 + \alpha t$ $\Delta \theta = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t$ $\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ $\omega_t^2 = \omega_0^2 + 2\alpha \Delta \theta$

Lintasan benda bergantung dengan kecepatan awal benda dan arah percepatannya. Gambar (1.8) menunjukkan lintasan bermacam benda dengan berbagai percepatan



**Gambar 1.8.** (a) sebuah bola dilemparkan ke atas, (b) sebuah peluru saat ditembakkan, (c) gerak melingkar, arah percepatan selalu tegak lurus dengan arah lintasan, (d) gerak peluru ketika benda jatuh ke bawah.



## Life Skills : Kecakapan Vokasional

Berkunjuglah ke suatu bengkel, tanyakan kepada karyawan yang ada di bengkel tersebut sehingga kalian dapat menjawab pertanyaan berikut ini :

1. Sebutkanlah benda-benda di sekitar kalian yang bergerak melingkar dengan jari-jari konstan dengan kelajuan konstan.
2. Sebutkanlah benda-benda di sekitar kalian yang bergerak melingkar dengan jari-jari konstan tetapi kelajuannya tidak konstan.



## Ringkasan

### 1. Kelajuan rata-rata

Kelajuan rata-rata adalah jarak total dibagi waktu total.

$$\text{Kelajuan rata-rata} = \frac{\text{jarak total}}{\text{waktu total}}$$

Kelajuan rata-rata merupakan besaran skalar, satuannya meter/detik.

### 2. Kecepatan rata-rata

Kecepatan rata-rata adalah perpindahan dibagi selang waktu.

$$\begin{aligned}\text{Kecepatan rata-rata} &= \frac{\text{perpindahan}}{\text{selang waktu}} \\ &= \frac{\Delta x}{\Delta t}\end{aligned}$$

Kecepatan rata-rata merupakan besaran vektor, perpindahan adalah perubahan posisi.

### 3. Kecepatan sesaat

Kecepatan sesaat adalah limit kecepatan rata-rata jika selang waktu mendekati nol. Kecepatan

sesaat merupakan turunan posisi terhadap waktu.

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

Kecepatan sesaat adalah kecepatan setiap waktu. Kecepatan sesaat secara grafis merupakan gradien garis singgung kurva posisi sebagai fungsi waktu. Besarnya kecepatan sesaat disebut kelajuan.

### 4. Percepatan rata-rata

Percepatan rata-rata adalah perubahan kecepatan dibagi selang waktu

$$a_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

### 5. Percepatan sesaat

Percepatan sesaat adalah limit percepatan rata-rata jika selang waktu mendekati nol, merupakan turunan kecepatan terhadap waktu atau turunan kedua posisi terhadap waktu. Satuan percepatan meter/detik<sup>2</sup>.



$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

6. Gerak dengan percepatan konstan  
Pada gerak dengan percepatan konstan berlaku:

$$v = v_o = at$$

$$v_{rata-rata} = \frac{v_o + v}{2}$$

$$x = x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2$$

$$v^2 = v_o^2 + 2a\Delta x$$

7. Gerak jatuh bebas

Salah satu contoh gerak dengan percepatan konstan adalah gerak jatuh bebas. Benda yang dilepas dari ketinggian  $h$  akan mendapat percepatan dari gravitasi bumi yang besarnya dapat dianggap konstan menuju bumi. Kecepatan awal benda adalah nol.

8. Gerak parabola

Gerak parabola memiliki komponen kecepatan pada sumbu  $x$  dan pada sumbu  $y$ , benda yang ditembakkan dengan sudut  $\theta$  memiliki percepatan, kecepatan dan posisi arah sumbu  $x$ :

$$a_x = 0,$$

$$v_{ox} = v_o \cos \theta, \quad v_x(t) = v_{ox}$$

$$x = x_o + v_o \cos \theta t$$

pada arah sumbu  $y$ :

$$a_y = -g$$

$$v_{oy} = v_o \sin \theta, \quad v_y(t) = v_{oy} + at$$

$$= v_o \sin \theta - gt$$

$$y = y_o + v_o \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2$$

9. Gerak melingkar dengan kelajuan konstan

Partikel yang bergerak dengan jari-jari konstan dan kelajuan konstan memiliki percepatan sentripetal

$$\text{sebesar } a = \frac{v^2}{r}$$

Kelajuan partikel tetap, akan tetapi arah gerak partikel berubah searah dengan lintasan partikel.

Partikel memiliki percepatan ke arah radial dan ke arah tangensial.

10. Gerak melingkar dengan jari-jari konstan

Pada gerak melingkar dengan jari-jari konstan  $R$  memiliki kecepatan

$$\text{sudut } \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Kaitan antara kecepatan sudut dan kecepatan linearnya (kecepatan tangensialnya)  $v = \omega R$

Arah kecepatan linear searah dengan arah lintasan partikel

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Partikel memiliki percepatan linear atau percepatan tangensial yang arahnya sejajar lintasan partikel  $a_t$ .

$$a_t = \frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = r\alpha$$

Pada gerak melingkar dengan kecepatan konstan berlaku:

$$\omega(t) = \omega_o + \alpha t$$

$$\theta = \theta_o + \omega t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$



## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Suatu benda bergerak menurut persamaan  $x = 4t^3 + 2t^2 + 3$ . Besar percepatan benda pada detik ke 2 adalah .... (dalam  $\text{m/s}^2$ ).  
A. 27  
B. 50  
C. 52  
D. 54  
E. 64
2. Suatu benda bergerak dengan persamaan  $x = 5t^2 + 20t + 5$ . Dari persamaan tersebut besarnya posisi awal, kecepatan awal dan percepatan berturut-turut adalah dalam ( $\text{m/s}^2$ ,  $\text{m/s}$ ,  $\text{m}$ ) ....  
A. 5,10,15  
B. 5,10,20  
C. 5,20,5  
D. 5,20,10  
E. 10,20,5
3. Sebuah benda ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal 200  $\text{m/s}$ . Bila  $g = 10 \text{ m/det}^2$  maka tinggi maksimum yang dicapai benda adalah ....  
A. 2000 m  
B. 3000 m  
C. 3500 m  
D. 4000 m  
E. 25000 m
4. Sebuah benda dijatuhkan dari puncak sebuah menara tanpa kecepatan awal. Setelah 2 detik benda sampai di permukaan tanah. Bila percepatan gravitasi  $10 \text{ m/det}^2$ . Ketinggian menara tersebut adalah ....  
A. 10 m  
B. 15 m  
C. 20 m  
D. 25 m  
E. 40 m

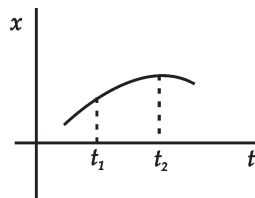
5. Benda yang jatuh bebas ketinggiannya akan berkurang sebanding dengan ....
- A. waktu
  - B. kuadrat waktu
  - C. akar gravitasi
  - D. kuadrat gravitasi
  - E. akar waktu
6. Dua orang anak bermain, melempar bola ke atas dari ketinggian yang sama dengan perbandingan kecepatan awal 2 : 1. Perbandingan tinggi maksimum kedua bola diukur dari ketinggian semula ....
- A. 2 : 1
  - B. 3 : 1
  - C. 4 : 1
  - D. 3 : 2
  - E. 4 : 3
7. Pada saat sebuah bola dilempar ke atas secara vertikal maka ....
- A. percepatannya berkurang
  - B. kecepatannya konstan
  - C. percepatannya konstan
  - D. percepatannya bertambah
  - E. kecepatannya bertambah
8. Sebuah peluru ditembakkan sedemikian rupa sehingga jarak tembakkannya sama dengan tiga kali tinggi maksimum. Jika sudut elevasi  $\theta$ , maka besar  $\tan \theta$  adalah ....
- A.  $\frac{1}{4}$
  - B.  $\frac{1}{2}$
  - C.  $\frac{3}{4}$
  - D.  $\frac{4}{3}$
  - E. 2

9. Peluru ditembakkan ke atas dengan kecepatan awal  $1,4 \times 10^3$  m/s dan mengenai sandaran yang jarak mendatarnya sejauh  $2 \times 10^5$  m. Bila percepatan gravitasi  $9,8 \text{ m/s}^2$ , sudut elevasinya  $\alpha$ , maka  $\alpha$  adalah ....
  - A.  $10^\circ$
  - B.  $30^\circ$
  - C.  $45^\circ$
  - D.  $60^\circ$
  - E.  $75^\circ$
10. Sebuah bola ditendang dengan kecepatan awal 20 m/s dan sudut elevasi  $30^\circ$ . Jarak maksimum yang dicapai bola adalah ....
  - A. 5 m
  - B. 10 m
  - C.  $10\sqrt{3}$  m
  - D. 20 m
  - E.  $20\sqrt{3}$  m
11. Sebuah benda dijatuhkan dari pesawat terbang yang melaju horisontal dengan kelajuan 720 km/jam pada ketinggian 490 m. Benda akan jatuh pada jarak horisontal sejauh ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) ....
  - A. 1.000 m
  - B. 2.000 m
  - C. 2.450 m
  - D. 2.900 m
  - E. 4.000 m
12. Sebuah benda bergerak dengan kecepatan sudut putaran 120 putaran tiap menit dengan jari-jari 10 cm, maka kecepatan linearnya ....
  - A. 0,627 m/det
  - B. 1,256 m/det
  - C. 6,28 m/det
  - D. 12,5 m/det
  - E. 125,6 m/det
13. Perbandingan kecepatan sudut jarum jam penunjuk jam, menit, dan detik pada suatu jam dinding adalah ....
  - A. 1:6:12
  - B. 1:12:18
  - C. 1:12:36
  - D. 1:12:360
  - E. 1:12:720

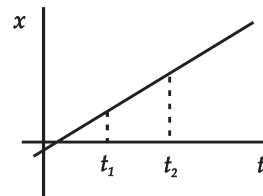
14. Seorang anak duduk di atas kursi pada roda yang berputar vertikal. Jika jari-jari roda 2,5 m, maka laju maksimum roda agar anak tidak lepas dari tempat duduknya ....
- 2 m/s
  - 4 m/s
  - 5 m/s
  - 6 m/s
  - 8 m/s
15. Sebuah cakram dengan jari-jari  $R$  berputar beraturan sekeliling sumbu horisontal melalui pusatnya. Jika titik  $P$  terletak pada tepi cakram dan  $Q$  pada pertengahan antara pusat dan  $P$  maka ....
- kecepatan sudutnya sama
  - kecepatan sudut keduanya = 0
  - kecepatan tangensial  $P$  dua kali kecepatan tangensial  $Q$
  - percepatan tangensial keduanya sama dengan nol
  - kecepatan tangensial  $P$  setengah dari kecepatan tangensial  $Q$

**B. Kerjakan soal di bawah ini!**

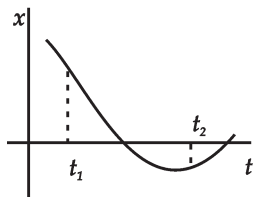
1. Dari grafik  $x$  terhadap  $t$  di bawah tunjukkan pada masing-masing gambar apakah kecepatan saat di  $t_2$  lebih besar atau lebih kecil atau sama dengan  $t_1$ ?



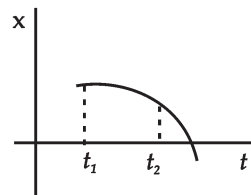
(a)



(b)



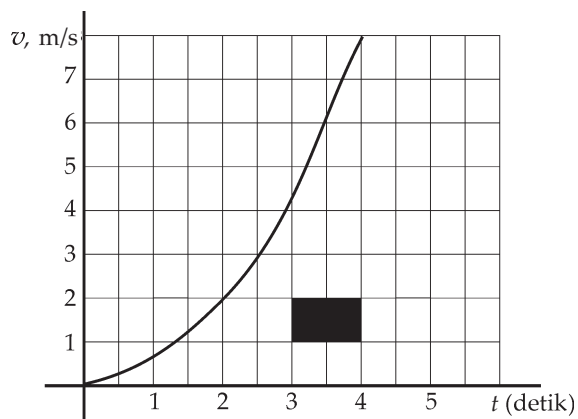
(c)



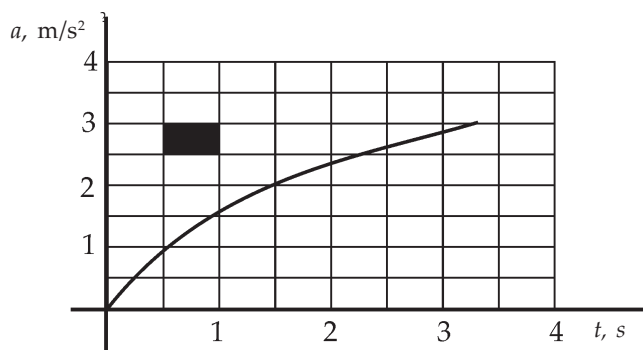
(d)



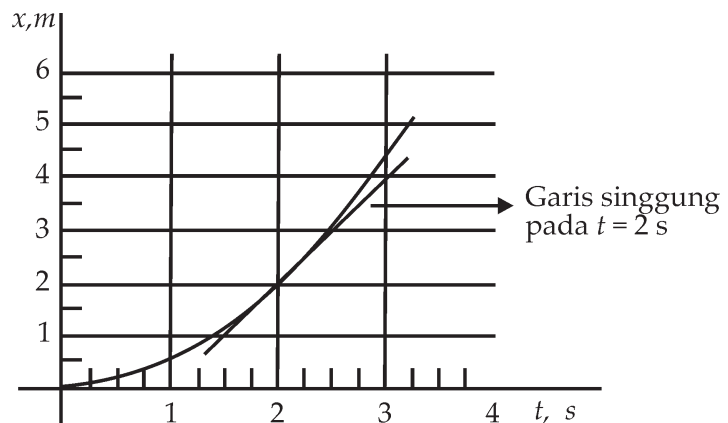
2. Kecepatan sebuah partikel terhadap waktu ditunjukkan pada grafik  $v$  terhadap  $t$  di bawah ini. (a). Berapakah luas persegi panjang yang tergambar? (b). Carilah nilai pendekatan perpindahan partikel untuk selang waktu 1 detik mulai saat  $t = 1$  detik dan  $t = 2$  detik. (c). Berapakah kira-kira kecepatan rata-rata untuk selang dari  $t = 1$  sampai  $t = 3$  detik?



3. Percepatan sebuah partikel terhadap waktu ditunjukkan oleh grafik  $a$  terhadap  $t$  di bawah ini.
- Berapakah luas persegi panjang yang ditunjukkan?
  - Partikel mulai bergerak dari keadaan diam pada  $t = 0$ . Carilah kecepatan saat  $t = 1$ ,  $t = 2$  dan  $t = 3$  detik dengan menghitung jumlah persegi panjang di bawah kurva.



4. Sebuah mobil bergerak sepanjang garis lurus dengan kecepatan rata-rata 80 km/jam dan kemudian dengan kecepatan rata-rata 40 km/jam selama 1,5 jam. (a) Berapakah perpindahan total untuk perjalanan 4 jam ini? (b) Berapakah kecepatan rata-rata untuk total perjalanan ini?
5. Seorang pelari menempuh jarak 2 km selama 5 menit dan kemudian membutuhkan waktu 10 menit untuk berjalan kembali ke titik awal. (a) Berapakah kecepatan rata-rata selama 5 menit pertama? (b) Berapakah kecepatan rata-rata selama waktu yang dipakai untuk berjalan? (c) Berapakah kecepatan rata-rata untuk total perjalanan? (d) Berapakah kelajuan rata-rata untuk total perjalanan?
6. (a) Berapakah waktu yang dibutuhkan pesawat supersonik untuk terbang dengan kelajuan 2,4 kali kelajuan bunyi untuk menempuh jarak 5.500 km bila kelajuan bunyi 350 m/det? (b) Berapakah waktu yang diperlukan pesawat subsonik yang terbang dengan kelajuan 0,9 kali kelajuan suara untuk menempuh jarak yang sama?
7. Sebuah mobil yang menempuh perjalanan 100 km menjalani 50 km pertama dengan kelajuan 40 km/jam. Seberapa cepat mobil itu harus menjalani 50 km kedua untuk mendapatkan nilai kelajuan rata-rata 50 km/jam?
8. Untuk grafik  $x$  terhadap  $t$  yang ditunjukkan pada gambar di bawah (a) Carilah kecepatan rata-rata untuk selang  $t=1$  detik sampai  $t=2$  detik. (b). Carilah kecepatan sesaat pada  $t=2$  detik.



9. Sebuah mobil bergerak dengan kelajuan 45 km/jam pada saat  $t = 0$ . Mobil dipercepat dengan percepatan konstan 10 km/j.s. (a) Berapa kecepatan mobil pada  $t = 1$  detik dan pada  $t = 2$  detik? (b) Berapakah kelajuan pada saat  $t$ ?



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. gerak lurus,
2. vektor posisi, vektor kecepatan, dan vektor percepatan,
3. gerak parabola, dan
4. gerak melingkar

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

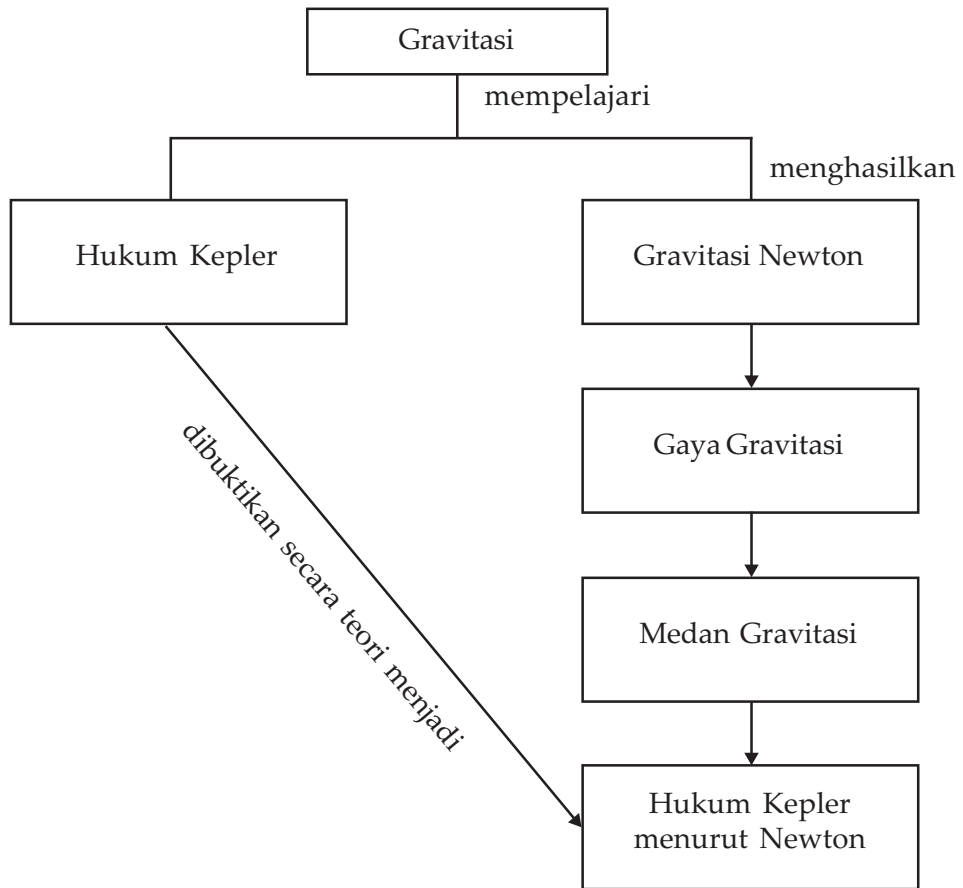
## Bab II Gravitasi



Sumber : [www.gla.ac.uk](http://www.gla.ac.uk)

*Pergantian pagi, siang, dan malam adalah bentuk keteraturan di tata surya. Keteraturan ini disebabkan adanya gravitasi yang bekerja pada tiap-tiap anggota tata surya.*

# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan dapat :

1. mengetahui bagaimana planet-planet dapat bergerak dengan teratur,
2. mengetahui gaya-gaya yang dapat membuat planet bergerak secara teratur, dan
3. menyelesaikan masalah-masalah yang berkaitan dengan keteraturan planet serta memanfaatkan pengetahuan gaya-gaya tersebut dalam kehidupan sehari-hari.





## Motivasi Belajar

Tuhan telah menciptakan bumi, bulan, dan matahari yang begitu indah dan juga bergerak secara teratur. Pernahkah kalian memandang bulan di suatu malam yang cerah? Indah sekali bukan? Pernahkan kalian mengamati bagaimana gerakan bulan, gerakan matahari, dan gerakan bintang-bintang? Bagaimanakah pergerakan benda-benda langit tersebut?



## Kata-kata Kunci

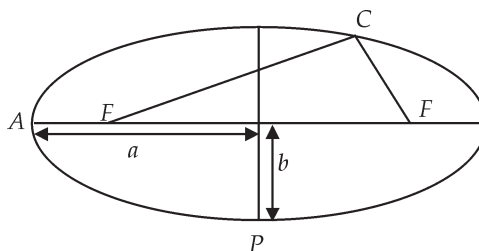
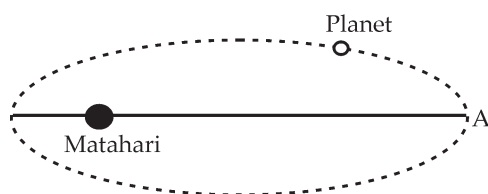
gravitasi, hukum Kepler, gravitasi Newton, medan gravitasi

### A. Hukum Kepler

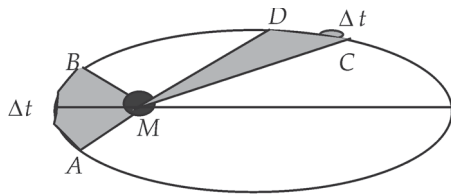
Pada bagian ini kita akan mempelajari hukum Kepler tentang gerak planet. Kepler melakukan pengamatan pada gerak planet-planet dan mengambil kesimpulan seperti yang kita kenal sebagai hukum Kepler. Hukum Kepler bersifat empiris karena diturunkan dari pengamatan. Hukum Kepler ada tiga yaitu :

1. Semua planet bergerak dalam orbit elips dengan matahari di salah satu fokusnya.
2. Garis yang menghubungkan tiap planet ke matahari menyapu luasan yang sama dengan waktu yang sama.
3. Kuadrat periode tiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dari matahari.

Hukum Kepler pertama dapat ditunjukkan pada Gambar (2.1).



**Gambar 2.1.** Hukum Kepler yang pertama menyatakan planet bergerak dengan orbit berbentuk elips, dengan matahari sebagai di salah satu titik fokusnya. Gambar sebelah kanan adalah sebuah elips dengan sumbu mayor dan sumbu minornya. Panjang F-C-F selalu tetap, dengan sembarang titik pada elips.



**Gambar 2.2** Luasan bidang AMB sama luasnya dengan CMD. Busur AB dicapai dalam selang waktu yang sama dengan busur CD yaitu selama  $\Delta t$ . Kecepatan saat planet dekat dengan matahari lebih cepat dibandingkan saat jauh dari matahari.

Titik  $F$  dinamakan titik fokus. Jarak  $a$  dinamakan sumbu semimayor dan  $b$  dinamakan sumbu semiminor. Jika titik fokus digerakkan saling mendekat, elips makin menyerupai lingkaran. Lingkaran sebenarnya adalah keadaan istimewa dari elips yaitu bila kedua titik fokusnya berimpit. Titik  $P$  dinamakan *perihelion*, bila sebuah planet berada di titik ini maka dikatakan planet berada di jarak terdekatnya. Titik  $A$  dinamakan *aphelion* dan jika sebuah planet berada di titik ini dikatakan planet berada di titik terjauhnya.

Hukum Kepler kedua dapat dijelaskan pada Gambar (2.2).

Sebuah planet bergerak lebih cepat pada saat dekat dengan matahari dibandingkan saat jauh dari matahari. Lihat Gambar (2.2). Luasan AMB luasnya sama dengan luasan CMD. Busur AB lebih panjang dari busur CD sedangkan waktu yang diperlukan untuk melintasi busur AB sama dengan waktu untuk melintasi CD. Jika demikian, mana yang lebih cepat saat melintasi busur AB atau saat melintasi busur CD?

Hukum Kepler ketiga dapat dituliskan dalam bentuk persamaan matematis sebagai berikut :

$$T^2 = Cr^3 \quad \dots (1)$$

daya  $T$  = periode

$r$  = jari-jari rata planet mengelilingi matahari



### Contoh Soal 1

Jarak rata-rata antara Mars dan matahari adalah 1,52 kali jarak rata-rata bumi dan matahari. Berapa tahun Mars mengelilingi matahari ?

**Penyelesaian :**

Diketahui :

$$R_{Mars} = 1,52 R_{Bumi} \quad T_{Bumi} = 1 \text{ tahun}$$

Jawab :

Dari persamaan (1)

$$T_{Bumi}^2 = CR_{Bumi}^3 \text{ dan } T_{Mars}^2 = CR_{Mars}^3$$

sehingga

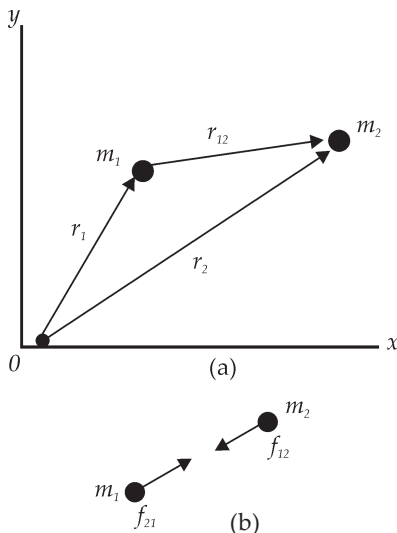
$$\frac{T_{Mars}^2}{T_{Bumi}^2} = \frac{R_{Mars}^3}{R_{Bumi}^3}$$

$$T_{Mars}^2 = \frac{R_{Mars}^3}{R_{Bumi}^3} T_{Bumi}^2 = \frac{(1,52 R_{Bumi})^3}{R_{Bumi}^3} (1 \text{ tahun})^2$$

$$T_{Mars}^2 = 1,87 \text{ tahun}$$

## B. Gravitasi Newton

Kita telah membahas tentang massa dan berat. Masih ingatkah apa perbedaan antara keduanya? Mari kita lihat kembali ungkapan hukum Newton yang kedua untuk benda yang jatuh ke bawah gaya yang bekerja pada benda dinamakan gaya gravitasi. Percepatan yang dialami benda disebabkan oleh gaya gravitasi, sehingga percepatan benda tersebut disebut percepatan gravitasi. Berapa besarnya dan bagaimana arahnya? Mari kita lihat dulu apa yang disebut sebagai gaya gravitasi.



**Gambar 2.3** Pasangan gaya gravitasi dan arahnya. Benda satu akan memberikan gaya aksi  $F_{12}$  kepada benda kedua, benda kedua akan memberikan gaya reaksi  $F_{21}$  kepada benda satu. Besar  $F_{12} = F_{21}$  tetapi arahnya berlawanan.

### 1. Gaya Gravitasi

Gaya gravitasi adalah gaya tarik-menarik antara dua benda yang bermassa.

Gaya antara dua massa  $m_1$  dan  $m_2$  berjarak  $r_{12}$  adalah:

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2} \vec{r}_{12} \quad \dots \quad (2)$$

Sedangkan  $G$  adalah konstanta gravitasi universal yang nilainya  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ .

Arah  $\vec{r}_{12}$  dapat dijelaskan sebagai berikut. Benda kesatu akan mengalami gaya tarikan ke arah benda kedua dan

benda kedua akan mengalami gaya tarikan ke arah benda kesatu. Besar gaya yang dialami benda kesatu sama dengan gaya yang dialami benda kedua, yaitu sesuai hukum aksi reaksi. Benda satu memberikan gaya gravitasi ke benda kedua, benda kedua memberikan reaksi dengan memberikan gaya gravitasi yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan. Jadi, tanda (-) menunjukkan kedua massa tarik-menarik.

## 2. Medan Gravitasi

Mari kita tinjau sebuah benda bermassa  $m_1$  kemudian kita letakkan benda kedua bermassa  $m_2$  pada jarak sejauh  $r$ . Gaya gravitasi kedua benda itu dapat dihitung menurut rumus di atas. Benda kedua akan merasakan gaya gravitasi menuju ke benda pertama. Besarnya gaya persatuan massa yang dirasakan benda kedua adalah

$$g(r) = \frac{F_2}{m_2} = \frac{Gm_1}{r^2} \frac{m_2}{m_2}$$

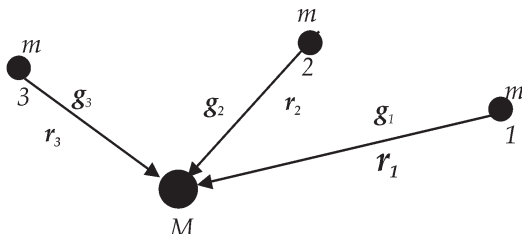
$$g(r) = \frac{Gm_1}{r^2} \quad \dots (3)$$

Gaya gravitasi tiap satuan massa disebut medan gravitasi.

Tampak bahwa besar medan gravitasi hanya tergantung pada massa sumber dan jarak.

Kita bisa mengatakan medan gravitasi menunjukkan suatu ruangan di sekitar benda bermassa, sehingga di ruangan itu benda bermassa yang lain akan merasakan gaya gravitasi persatuan massanya sama dengan besar medan gravitasi di ruangan itu. Atau benda lain akan mendapat percepatan gravitasi sama dengan medan gravitasi di ruangan itu.

Misalkan bumi kita bermassa  $M_b$  dari sebuah satelit bermassa  $m$ . Benda di sekitar bumi akan mendapat percepatan gravitasi sebesar  $\frac{GM_b}{r^2}$ , atau merasakan medan gravitasi sebesar itu dengan arah menuju ke bumi. Besar medan yang dirasakan satelit tidak bergantung pada massa satelit, tetapi bergantung pada kuadrat jarak antara bumi dan satelit.



**Gambar 2.4** Benda  $M$  mengakibatkan benda-benda bermassa di sekitarnya mengalami medan gravitasi. Besar medan gravitasi yang dialami tidak tergantung pada massa benda  $m$  tetapi bergantung pada jarak antara massa  $M$  dan massa  $m$ .



### Contoh Soal 2

Matahari diperkirakan memiliki massa  $1,49 \times 10^{30}$  kg. Massa bumi  $5,9 \times 10^{24}$  kg. Jarak rata-rata bumi dan matahari  $1,496 \times 10^{11}$  m. Berapa besarnya gaya tarik-menarik antara matahari dan bumi?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$M_{\text{Matahari}} = 1,49 \times 10^{30} \text{ kg}, \quad M_{\text{Bumi}} = 5,9 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Bumi}} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

*Jawab :*

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2} = -(6,67 \times 10^{-11}) \frac{(1,49 \times 10^{30} \text{ kg})(5,9 \times 10^{24} \text{ kg})}{(1,49 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

$$= -26,3 \times 10^{21} \text{ N}$$

Tanda (-) menunjukkan gaya tarik-menarik, jadi besarnya  $= 26,3 \times 10^{21} \text{ N}$



### Contoh Soal 3

Hitunglah gaya tarik menarik antara dua benda yang terpisah sejauh 10 cm, bila massa masing-masing benda 5 kg!

**Penyelesaian :**

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2} = (6,67 \times 10^{-11}) \frac{(5 \text{ kg})(5 \text{ kg})}{(0,1 \text{ m})^2}$$

$$= 16675 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Besarnya gaya tarik-menarik adalah  $16675 \times 10^{-11} \text{ N}$



### Contoh Soal 4

Hitunglah gaya gravitasi antara benda bermassa 60 kg yang terletak di permukaan bumi dengan bumi yang bermassa  $5,98 \times 10^{24}$  kg bila jari-jari bumi adalah  $6,37 \times 10^6$  m!

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2} = -(6,67 \times 10^{-11}) \frac{(60 \text{ kg})(5,98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(6,37 \times 10^6 \text{ m})^2}$$

$$= 589 \text{ N}$$

Besarnya gaya tarik-menarik adalah 589 N

Contoh-contoh di atas menunjukkan gaya gravitasi benda-benda di permukaan jauh lebih kecil dari pada gaya gravitasi antarplanet.



### Contoh Soal 5

- Hitunglah percepatan gravitasi yang dialami sebuah pesawat yang berada 200 m di atas permukaan bumi.
- Hitunglah percepatan gravitasi yang dialami orang yang berada 1 m di atas permukaan bumi.

*Penyelesaian :*

$$\begin{aligned} \text{a. } g(r) &= \frac{GM}{r^2} \\ &= \frac{(6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2)(5,98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(6,37 \times 10^6 \text{ m} + 200 \text{ m})^2} \\ &= 9,8 \text{ m / det}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } g(r) &= \frac{GM}{r^2} \\ &= \frac{(6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2)(5,98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(6,37 \times 10^6 \text{ m} + 1 \text{ m})^2} \\ &= 9,8 \text{ m / det}^2 \end{aligned}$$





### Contoh Soal 6

Massa bulan adalah  $7,35 \times 10^{22}$  kg, jari-jarinya  $1,738 \times 10^6$  m. Bila sebuah benda beratnya di permukaan bumi adalah 9,8 N, berapakah beratnya bila berada di bulan?

**Penyelesaian :**

$W = mg = 9,8$  N, maka massa benda adalah  $9,8/g$ . Percepatan gravitasi bumi di permukaan bumi adalah 9,8 maka massa benda 1 kg. Berat ketika di bulan adalah  $W = mg_{\text{bulan}}$ . Percepatan gravitasi bulan adalah:

$$\begin{aligned} g(r) &= \frac{GM}{r^2} \\ &= \frac{(6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2) (7,35 \times 10^{22} \text{ kg})}{(1,738 \times 10^6)^2} \\ &= 1,62 \text{ m.s}^{-2} \end{aligned}$$

Berat ketika di bulan adalah

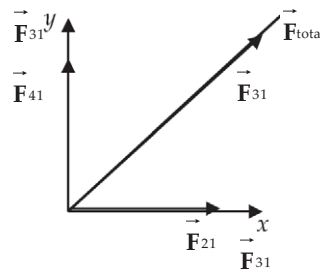
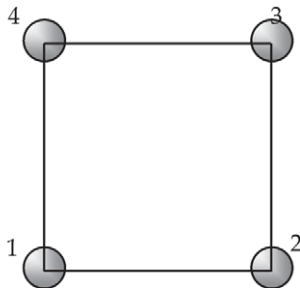
$$\begin{aligned} W &= m \cdot g_{\text{bulan}} \\ &= 1,62 \text{ N} \end{aligned}$$



### Contoh Soal 7

Empat buah massa yang sama sebesar  $m$  membentuk sebuah bujur sangkar berjari-jari  $R$  dengan masing-masing massa terletak disudut bujur sangkar. Berapakah gaya gravitasi yang dialami massa di salah satu sudut?

**Penyelesaian :**



Massa 1 akan merasakan gaya karena massa 2, dengan arah menuju  $m_2$ .

Besarnya gaya adalah  $F_{12} = \frac{Gm^2}{R^2}$ ,

Massa 1 juga merasakan gaya karena massa 4 yang arahnya menuju  $m_4$ ,

besarnya gaya  $F_{14} = \frac{Gm^2}{R^2}$ ,

Massa 1 juga merasakan gaya karena massa 3. Jarak antara  $m_1$  dan  $m_3$  adalah  $r$ .  $r = \sqrt{R^2 + R^2}$  maka gaya gravitasi antara massa 1 dan massa 3 adalah  $F_{12} = \frac{Gm^2}{R^2 + R^2}$

Arah gaya  $F_{12}$  adalah ke arah sumbu  $x$  positif, arah  $F_{14}$  ke arah sumbu  $y$  positif, arah  $F_{13}$  adalah arah dari massa 1 ke massa 3. Untuk menjumlahkan ketiga gaya tersebut maka  $F_{13}$  yang merupakan besaran vektor kita uraikan ke arah sumbu  $y$  dan ke sumbu  $x$ .

$$F_{13x} = F_{13} \cos 45 = F_{13} \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$F_{13y} = F_{13} \sin 45 = F_{13} \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Total gaya ke arah sumbu  $x$  :

$$F_x = F_{12} + F_{13} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{Gm^2}{R^2} + \frac{Gm^2 \sqrt{2}}{2R^2 2} = \frac{Gm^2}{r^2} \left( \frac{4 + \sqrt{2}}{4} \right)$$

Total gaya ke arah sumbu  $y$  :

$$F_y = F_{14} + F_{13} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{Gm^2}{R^2} + \frac{Gm^2 \sqrt{2}}{2R^2 2} = \frac{Gm^2}{r^2} \left( \frac{4 + \sqrt{2}}{4} \right)$$

$$\text{Besarnya gaya total } F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{Gm^2}{R^2} \left( \frac{1 + 2\sqrt{2}}{2} \right)$$

$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x}$ ,  $\theta$  = adalah sudut antara gaya total  $F_{\text{total}}$  dengan sumbu  $x$ . Karena

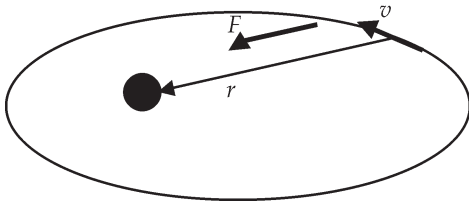
$F_y = F_x$  maka sudut yang terbentuk  $45^\circ$ .



### Wawasan Kewirausahaan : Semangat Kewirausahaan

Kalian telah mempelajari teori gravitasi Newton. Lakukan kegiatan mekanik untuk bisnis yang menggunakan pengetahuan tersebut! Jika mengalami kesulitan karena sendirian, bergabunglah dengan beberapa teman. Konsultasilah kepada guru kalian!

## C. Hukum Kepler Menurut Newton



**Gambar 2.5** Arah gaya yang dialami planet menuju ke matahari, dengan demikian vektor  $r$  dan  $F$  sejajar sehingga a torsi planet nol. Kecepatan planet sejajar dengan orbit planet arah momentum sudut ke arah atas. Torsi nol maka momentum sudutnya kekal.

Newton menunjukkan bahwa pada umumnya bila sebuah benda bergerak dipengaruhi oleh *gaya sentral* (gaya yang selalu mengarah ke pusat gaya) maka lintasan benda itu adalah elips, parabola, atau hiperbola. Lintasan atau orbit yang berbentuk elips, disebut memiliki orbit tertutup, sedang orbit hiperbola dan parabola dinamakan memiliki orbit terbuka. Salah satu contoh gaya sentral adalah gaya gravitasi. Coba kalian perhatikan arah gaya gravitasi antara dua buah benda saling mendekati segaris

menuju pusat gaya, sedang besarnya gaya berbanding dengan  $1/r^2$ . Dengan demikian jelaslah hukum Kepler yang pertama yang menyatakan orbit planet berbentuk elips adalah akibat dari hukum gravitasi Newton.

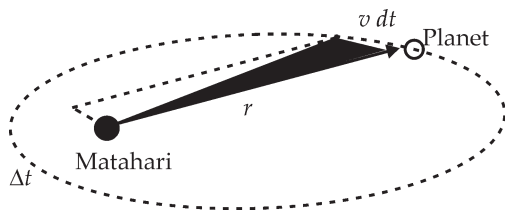
Demikian juga dengan hukum Kepler yang kedua, menurut Hukum Newton gaya yang diberikan oleh matahari pada planet diarahkan ke matahari. Planet ditarik ke arah matahari, karena arah gaya sepanjang garis dari planet ke matahari sedangkan arah gerakan tegak lurus dengan arah gaya maka gaya tersebut tidak memiliki torsi. Akibat tidak memiliki torsi atau torsi nol maka momentum sudut planet kekal. Kalian akan mempelajari kaitan antara torsi dengan momentum sudut pada bab dinamika rotasi.

Sebuah planet bergerak mengelilingi matahari. Dalam waktu  $dt$  maka planet bergerak sejauh  $vdt$  dan menyapu luasan sebesar pada Gambar (2.5), yang merupakan setengah luas jajaran genjang yang dibentuk oleh vektor posisi  $r$  dan  $v \Delta t$  atau besarnya jajaran genjang yaitu  $dA$  adalah  $r \times v \Delta t$ . dapat dituliskan sebagai:

$$dA = \frac{1}{2} |r \times v dt| = \frac{1}{2m} |r \times mv dt|$$

Kita nanti akan mengetahui bahwa besaran  $r \times mv$  adalah besaran momentum sudut  $L$ . Dengan demikian, luas yang disapu adalah:

$$dA = \frac{L}{2m} dt \quad \dots \quad (5)$$



**Gambar 2.6** Luas yang dibentuk selama waktu  $\Delta t$  sama dengan setengah luas jajaran genjang dengan sisi  $r$  dan  $v\Delta t$

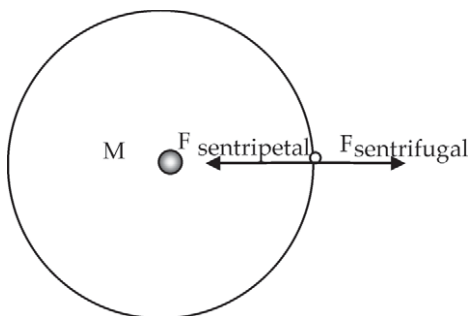
Oleh karena momentum sudut  $L$  konstan maka luasan yang disapu dalam selang waktu tertentu  $\Delta t$  yang sama akan sama untuk semua bagian orbit. Hal ini sama dengan bunyi hukum Kepler yang kedua.

Mengapa planet-planet dapat bergerak mengelilingi matahari? Pastilah ada gaya yang menarik planet sehingga tetap berada di garis edarnya. Kita telah mengetahui gaya yang menarik planet-planet itu adalah gaya gravitasi antara matahari dengan planet-planet. Mari kita tinjau gerak planet yang kita tinggali yaitu planet bumi.

Apabila planet bumi bermassa  $m$  mula-mula bergerak dengan kelajuan  $v$ , bila tidak ada gaya yang menarik bumi, planet akan tetap bergerak lurus. Bumi dapat bergerak melingkari matahari karena adanya gaya sentripetal. Gaya sentripetalnya berupa gaya gravitasi antara bumi dan matahari. Bumi yang bergerak melingkar memiliki gaya sentrifugal yang besarnya sebanding dengan kecepatannya dan jaraknya dari pusat putaran arahnya menuju keluar lingkaran. Karena keseimbangan antara gaya sentripetal dan gaya sentrifugal, maka bumi akan bergerak dengan mengelilingi matahari dengan orbit tertutup. Bila massa matahari adalah  $M$ , gaya-gaya yang bekerja pada bumi dapat dituliskan sebagai:

$$F_{\text{sentripetal}} = F_{\text{sentrifugal}}$$

$$\frac{Mm}{r^2} G = \frac{mv^2}{r}$$



**Gambar 2.7** Bumi mengelilingi matahari. Gaya yang dialami adalah gaya sentrifugal karena bumi berotasi dan gaya sentripetal berupa gaya gravitasi yang menahan bumi sehingga tidak keluar.

Dari persamaan di atas bisa kita dapatkan:

$$v^2 = \frac{GM}{r} \quad \dots (6)$$

Mari kita tinjau periode bumi yaitu  $T$ . Selama waktu  $T$  bumi menempuh perjalanan mengelilingi matahari satu kali putaran penuh, maka jarak yang dilalui adalah keliling lingkaran sebesar  $2\pi r$ . Kelajuan bumi adalah

$$v = \frac{2r\pi}{T} \quad \dots \quad (7)$$

Kita masukan persamaan (7) ke persamaan (6) kita mendapatkan  $v^2 = \left(\frac{2r\pi}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r}$

Dan kita akan memperoleh bahwa:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \quad \dots \quad (8)$$

Kita telah mendapatkan hukum ketiga Kepler.

Bagaimana untuk orbit planet yang tidak berbentuk lingkaran? Bila orbit planet tidak berupa lingkaran tetapi elips maka jari-jari  $r$  diganti jarak rata-rata antara planet dan matahari, yang besarnya sama dengan sumbu semimayor elips.



## Ringkasan

### 1. Hukum Kepler

Hukum Kepler ada tiga yang merupakan hukum secara empiris.

- Semua planet bergerak dalam orbit elips dengan matahari di salah satu fokusnya.
- Garis yang menghubungkan tiap planet ke matahari menyapu luasan yang sama dengan waktu yang sama pula.
- Kuadrat periode tiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dari matahari.

Konsekuensi dari hukum Kepler kedua: kecepatan planet yang mengelilingi matahari lebih besar pada titik terdekatnya, dan kecepatan planet lebih kecil pada titik terjauhnya. Hukum Kepler ketiga dapat dirumuskan sebagai:

$$T^2 = Cr^3$$

### 2. Gaya gravitasi

Hukum Gravitasi Newton menyatakan dua buah benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  yang dipisahkan oleh jarak sejauh  $r$  akan saling tarik menarik dengan gaya yang sebanding

dengan massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua massa:

$$F_{12} = - \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Gaya tarik-menarik berada pada garis lurus kedua benda.  $G$  adalah konstanta gravitasi universal. Tanda (-) menunjukkan gaya tarik-menarik.

### 3. Medan gravitasi

Benda bermassa  $M$  akan menyebabkan benda bermassa lain di sekitarnya yang berjarak  $r$  mengalami medan gravitasi atau percepatan gravitasi sebesar  $g(r) = \frac{Gm}{r^2}$

Medan gravitasi adalah gaya per-satuan massa. Arah medan gravitasi menuju massa  $M$ .

Massa  $M$  menyebabkan benda bermassa yang lain mengalami percepatan gravitasi sebesar medan gravitasi yang ditimbulkan oleh massa  $M$ .

Medan gravitasi didekat permukaan bumi dapat dianggap konstan.

### 4. Hukum Kepler berdasarkan hukum gravitasi Newton

(a) Hukum Kepler yang pertama dapat dijelaskan berdasarkan hukum gravitasi Newton yang menyatakan setiap benda yang dipengaruhi oleh gaya sentral akan memiliki lintasan berupa elips, lingkaran, parabola atau hiperbola.

(b) Hukum Kepler yang kedua dapat dijelaskan berdasarkan gaya yang bekerja pada planet dan matahari bekerja sepanjang garis lurus yang menghubungkan planet dan matahari sehingga momentum sudut yang diakibatkan oleh gaya tersebut kekal. (c) Hukum ketiga Kepler dapat dijelaskan berdasarkan kenyataan gaya antara planet dengan matahari sebanding dengan massa planet dan matahari dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak matahari dan planet.

Planet yang mengelilingi matahari bermassa  $M$  memiliki kaitan antar-periode dan jarak rata-ratanya sebagai

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Planet mengelilingi matahari karena adanya gaya sentripetal yang berupa gaya gravitasi antara matahari dan planet tersebut.





## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Kuat medan gravitasi pada permukaan bumi sama dengan ....

- A. gaya gravitasi
- B. energi potensial gravitasi
- C. potensial gravitasi
- D. tetapan gravitasi
- E. percepatan gravitasi

2. Dimensi dari tetapan gravitasi umum  $G$  adalah ....

- A.  $ML^2T^2$
- B.  $M^3L^3T^{-2}$
- C.  $M^{-1}L^3T^{-2}$
- D.  $M^2L^3T^{-2}$
- E.  $M^{-3}L^3T^{-2}$

3. Dua buah bulan dari planet Yupiter memiliki jari-jari yang sama, tetapi massanya berbanding 3:2. Perbandingan percepatan gravitasi pada permukaan kedua bulan tersebut adalah ....

- A. 2:3
- B. 3:2
- C. 4:9
- D. 6:1
- E. 9:4

4. Jari-jari bumi adalah  $R$  dan percepatan benda yang jatuh bebas pada permukaan bumi adalah  $g$ . Percepatan jatuh bebas pada ketinggian  $h$  di atas permukaan bumi adalah ....

- A.  $\frac{g}{(R+h)}$
- B.  $\frac{gR}{(R+h)}$
- C.  $\frac{gR}{(R+h)^2}$
- D.  $\frac{gh^2}{(R+h)^2}$
- E.  $\frac{gR^2}{(R+h)^2}$

5. Sebuah satelit memiliki berat  $W$  saat di permukaan bumi. Berapa gaya gravitasi bumi yang akan menarik satelit ketika satelit mengorbit di bumi dalam satu orbit lingkaran dengan jari-jari 3 kali jari-jari bumi?
- A.  $9W$
  - B.  $W/9$
  - C.  $W/4$
  - D.  $W/3$
  - E.  $W/2$
6. Besar gaya gravitasi antara dua buah benda yang berinteraksi adalah ....
- A. sebanding dengan kuadrat jarak kedua benda
  - B. sebanding dengan kudrat massa kedua benda
  - C. berbanding terbalik dengan jarak kedua benda
  - D. berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda
  - E. berbanding terbalik dengan kuadrat massa kedua benda
7. Kuat medan gravitasi di suatu titik di luar bumi yang berada sejauh  $x$  dari pusat bumi adalah  $5 \text{ N/kg}$ . Kuat medan gravitasi di permukaan bumi adalah  $10 \text{ N/kg}$ , maka besar jari-jari bumi adalah ....
- A.  $x/10$
  - B.  $x/5$
  - C.  $x/\sqrt{2}$
  - D.  $x\sqrt{2}$
  - E.  $1/2$
8. Sebuah benda diletakkan di permukaan bumi yang berjari-jari  $R$  memiliki berat sebesar  $360 \text{ N}$ . Jika benda diletakkan pada ketinggian  $2R$  dari permukaan bumi, maka berat benda menjadi ....
- A.  $40 \text{ N}$
  - B.  $90 \text{ N}$
  - C.  $120 \text{ N}$
  - D.  $180 \text{ N}$
  - E.  $360 \text{ N}$

9. Dua buah planet *A* dan *B* bergerak mengelilingi matahari. Perbandingan antara jarak planet *A* dan planet *B* matahari adalah  $RA : RB = 1 : 4$ . Jika periode planet *A* mengelilingi matahari adalah 88 hari, maka periode planet *B* adalah ....
  - A. 500 hari
  - B. 704 hari
  - C. 724 hari
  - D. 825 hari
  - E. 850 hari
10. Sebuah satelit bumi mengorbit setinggi 3600 km di atas permukaan bumi. Jika jari-jari bumi 6.400 km, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, maka kelajuannya (dalam km/detik) adalah ....
  - A. 6,4
  - B. 64
  - C. 640
  - D. 6.400
  - E. 64.000

**B. Kerjakan soal di bawah ini!**

1. Sebuah planet mengelilingi matahari dengan periode 5 tahun. Berapakah jarak rata-ratanya dari matahari?
2. Jari-jari orbit Bumi sekitar  $1,496 \times 10^{11}$  m, sedangkan jari-jari orbit Uranus adalah  $2,87 \times 10^{12}$  m. Berapakah periode Uranus?
3. Sebuah komet mengelilingi matahari dengan momentum sudut konstan. Komet ini memiliki jari-jari maksimum 150 SA, kelajuannya di jarak tersebut adalah  $7 \times 10^3$  m/s. Jarak terdekat komet ke matahari adalah 0,4 SA. Berapa kelajuannya di titik terdekat dengan matahari?
4. Umbriel adalah bulan milik Uranus memiliki jarak orbit rata-rata 267 Mm dan periodenya  $3,58 \times 10^5$  detik. (a) Carilah periode Oberon, bulan Uranus yang lain, yang jarak orbit rata-ratanya 586 Mm. (b) Berapa massa Uranus?

5. Sebuah benda ditembakkan ke atas dari permukaan bumi dengan kelajuan awal 4 km/s. Carilah ketinggian maksimum yang dapat dicapai benda tersebut!



## Refleksi

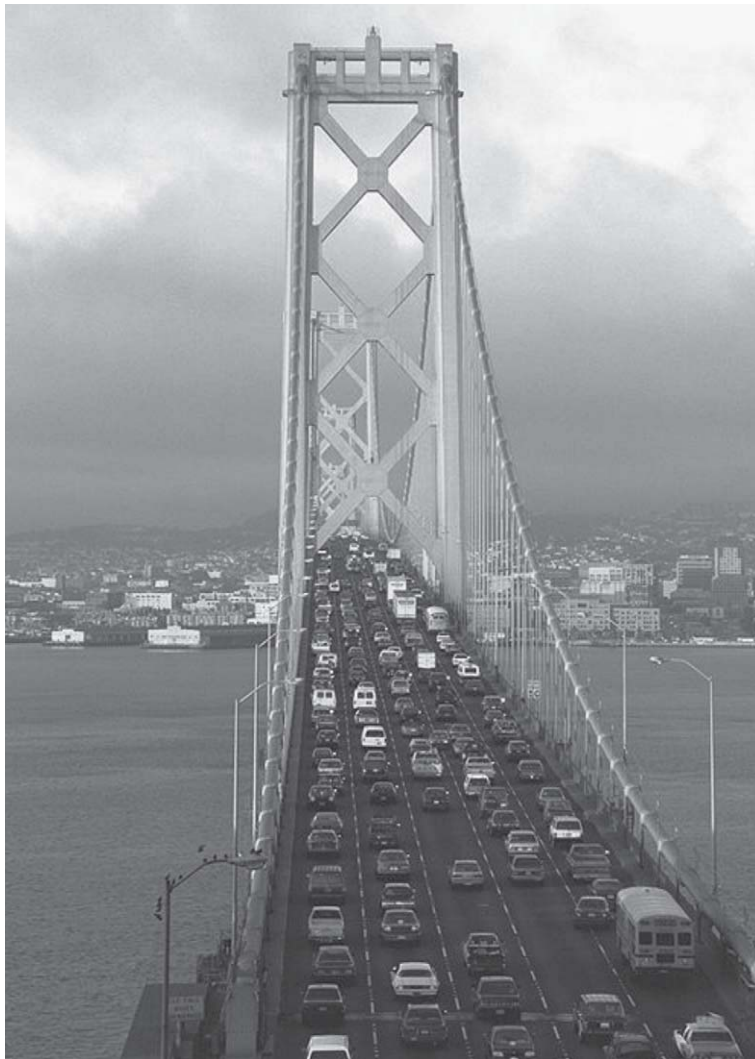
Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. hukum Kepler,
2. gravitasi Newton, dan
3. hukum Kepler menurut Newton.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab III

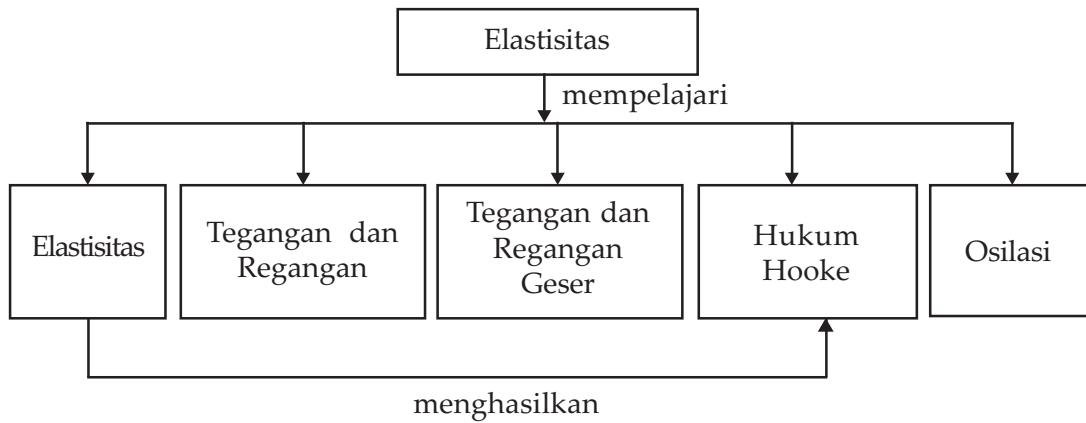
# Elastisitas



Sumber : [www.lib.ui.ac](http://www.lib.ui.ac)

*Baja yang digunakan dalam jembatan mempunyai elastisitas agar tidak patah apabila dilewati kendaraan. Agar tidak melebihi kemampuan elastisitas, harus ada pembatasan berat kendaraan yang melewatinya.*

# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. menganalisis gaya pegas yang dapat menimbulkan elastisitas, dan
2. menganalisis hubungan antara gaya, gerak, dan getaran serta mengenalinya pada gejala-gejala alam.





## Motivasi Belajar

Di alam semesta ini semua benda yang diberi gaya akan mengalami suatu perubahan. Apabila gaya hilang maka benda mungkin akan dapat kembali ke bentuk semula. Perubahan benda sangat dipengaruhi oleh elastisitas benda tersebut.

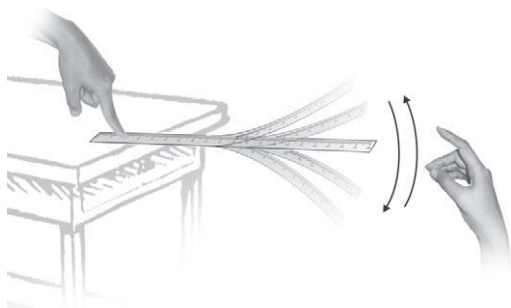
Banyak sekali kejadian di alam yang berkaitan dengan elastisitas. Kalian dapat melihat contoh-contoh elastisitas yang banyak terjadi pada kehidupan sehari-hari. Dengan adanya sifat elastisitas, maka dapat dijelaskan ada benda-benda yang tidak mudah patah dan benda yang mudah patah.



## Kata-kata Kunci

elastisitas, konstanta pegas, hukum Hooke, tegangan, regangan, modulus, osilasi, frekuensi, amplitudo, periode

### A. Elastisitas



**Gambar 3.1** Sebuah batang penggaris yang dijepit dan ujung yang lain diayunkan.

Pada bab ini kita akan mempelajari tentang elastisitas atau kemampuan benda untuk kembali ke bentuknya semula. Ambillah penggaris dari plastik, peganglah ujungnya kemudian ayunkan ke bawah dan lepaskan. Apa yang terjadi? Penggaris akan terayun ke bawah kemudian ke atas dan ke bawah lagi berulang-ulang. Penggaris selalu berusaha ke keadaan semula. Pernahkah kalian meloncat di atas *spring bed*? Apa yang terjadi? Bila kalian akan menekan *spring bed* ke bawah, kalian akan mendapat gaya yang membuat kalian

terpental ke atas. Ada gaya yang seolah menolak kalian. Gejala-gejala tadi menunjukkan elastisitas. Elastisitas sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Perhatikan gambar penggaris di atas, penggaris mampu melengkung tanpa patah karena penggaris memiliki elastisitas. Gaya yang kalian keluarkan cukup besar maka penggaris akan patah.

Jembatan dari baja akan melengkung jika terbebani atau terjadi perubahan panjang, dan akan kembali ke bentuk semula jika bebannya tidak ada. Namun jika beban kecil seringkali kita tidak melihat perubahan panjang atau kelengkungan jembatan. Mengapa pada jembatan bisa terjadi kelengkungan? Secara umum mengapa suatu materi bisa meregang? Suatu materi dapat kita anggap tersusun dari pegas-pegas. Jika kita menarik pegas maka akan terjadi regangan, jika kita menghilangkan tarikan pegas akan kembali seperti semula. Gaya yang dikerjakan oleh pegas serupa dengan gaya antaratom dalam molekul-molekul zat padat. Atom-atom tersebut dapat bergetar seperti gerakan massa yang terikat pada pegas.



### Life Skills : Kecakapan Vokasional

Carilah benda-benda di sekitarmu yang menunjukkan sifat elastisitas dan benda-benda yang tidak menampakkan sifat elastis. Adakah benda yang tidak elastis?

## B. Tegangan dan Regangan

Mari kita tinjau batang penghapus yang terbuat dari karet. Jika batang penghapus tadi kita tarik kedua ujungnya apakah yang terjadi? Batang penghapus akan memanjang. Jika tarikan kita dihentikan maka batang penghapus tadi kembali seperti semula. Benda seperti batang penghapus kita sebut benda elastis.

Benda padat yang dipengaruhi oleh gaya dari luar misalnya benda ditarik, digeser, atau ditekan maka bentuk benda akan berubah. Bila bentuk benda kembali seperti semula setelah gaya luarnya dihilangkan maka benda dikatakan elastik. Sebagian besar benda bersifat elastik sampai batas tertentu.

Bagaimana kalau benda diberi gaya melebihi batas elastisnya? Jika diberi gaya yang melebihi batas elastisnya maka benda tidak kembali ke bentuk semula, tetapi akan berubah bentuk secara permanen.

Lihatlah Gambar (3.2ab), sebuah batang tegar dipengaruhi oleh gaya tarikan sebesar  $F$  ke kanan di ujung kanan dan ke kiri di ujung kiri. Mari kita perhatikan bagian kecil dari batang yang panjangnya  $L$ . Bagian kecil batang ini dalam keadaan setimbang karena gaya di bagian kanan sama dengan gaya di

bagian kirinya. Gaya-gaya baik di bagian kiri maupun di bagian kanan didistribusikan secara merata pada luasan penampang  $A$ . Perbandingan gaya  $F$  terhadap luasan penampang  $A$  dinamakan *tegangan tarik*.  $F$  tegak lurus kuasa  $A$ .

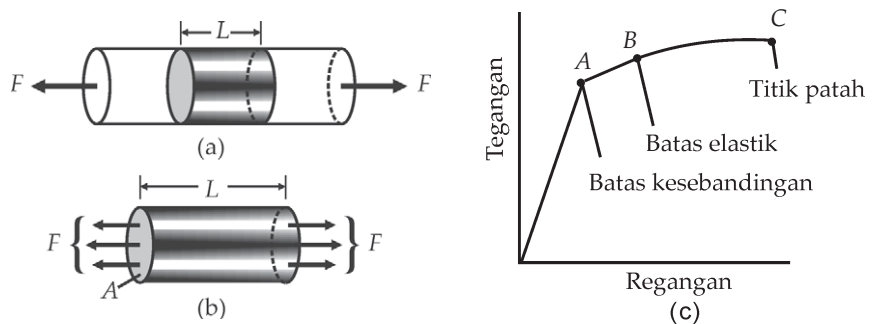
$$\text{Tegangan} = \frac{F}{A} \quad \dots (1)$$

Gaya-gaya yang bekerja pada batang berusaha membuat bahan meregang. Perubahan panjang per panjang dinamakan *regangan*.

Misalkan karena gaya  $F$  maka benda berubah panjangnya sebesar  $\Delta L$ .

$$\text{Regangan} = \frac{\Delta L}{L}$$

Bagaimana hubungan antara regangan dan tegangan pada batang padat? Mari kita lihat grafik Gambar (2.c).



**Gambar 3.2** (a,b) Sebuah batang karet ditarik dengan gaya  $F$  akan menyebabkan terjadi perubahan panjang. (c) Grafik hubungan antara tegangan dan regangan. Tegangan dan regangan sebanding sampai titik A. Bila tegangan terus diberikan sampai titik B antara tegangan dan regangan tidak linear lagi dan akan patah di titik C.

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara regangan dengan tegangan. Grafik tersebut linear sampai titik A. Hasil regangan yang berubah secara linear terhadap tegangan dikenal sebagai hukum Hooke. Pada daerah ini bila gaya dilepas atau tegangan dihentikan maka batang akan kembali seperti semula. Apabila tegangan diperbesar maka antara regangan dan tegangan tidak linear lagi. Jika gaya diperbesar lagi atau tegangan diperbesar maka akan mencapai titik B, titik B adalah batas elastik bahan. Batang ditarik melampaui B maka batang tidak akan kembali ke panjang semula, tetapi berubah bentuk secara permanen. Seandainya gaya diperbesar lagi maka

batang akan mencapai titik C, batang akhirnya patah. Titik C dinamakan titik patah. Perbandingan tegangan terhadap regangan pada daerah grafik yang linear adalah konstan, besarnya konstanta dinamakan *Modulus Young* diberi simbol  $Y$  atau sering disebut modulus elastis.

$$Y = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad \dots (2)$$

Satuan tegangan adalah satuan gaya per satuan luas atau  $\text{N/m}^2$ . Regangan tidak bersatuan. Sedangkan satuan Modulus Young adalah Newton per meter persegi atau  $\text{N/m}^2$ .



### Wawasan Kewirausahaan : Menumbuhkan Daya Saing

Kalian telah mempelajari teori tegangan dan regangan. Lakukan percobaan untuk menentukan nilai modulus young ( $Y$ ) dari suatu bahan (besi dan tembaga) di laboratorium. Buatlah laporan dari hasil percobaan tersebut. Konsultasikan dengan guru kalian.

## C. Tegangan dan Regangan Geser

Bagaimana jika gaya diberikan sejajar terhadap luas permukaan seperti gambar (3.3).

Gaya semacam itu dinamakan *gaya geser*. Perbandingan gaya geser terhadap luas  $A$  dinamakan *tegangan geser*.

$$\text{Tegangan geser} = \frac{F_s}{A} \quad \dots (3)$$

Tegangan geser akan mengubah bentuk benda seperti gambar (3.3). Perbandingan  $\frac{\Delta x}{L}$  dinamakan regangan geser

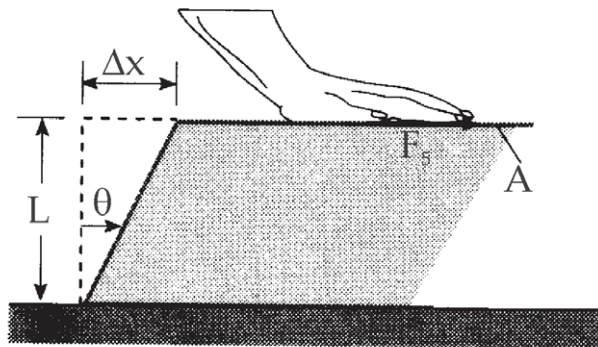
$$\text{Regangan geser} = \frac{\Delta x}{L} = \tan \theta \quad \dots (4)$$

Perbandingan antara tegangan geser terhadap regangan geser dinamakan modulus geser

$$M_s = \frac{\text{tegangan geser}}{\text{regangan geser}}$$

$$M_s = \frac{F_s / A}{\Delta x / L} = \frac{F_s / A}{\tan \theta} \quad \dots (5)$$

Modulus ini hampir konstan untuk tegangan geser yang kecil, yang berarti regangan geser berubah secara linear untuk tegangan kecil. Dengan demikian hukum Hooke berlaku untuk tegangan geser. Modulus geser sering juga disebut sebagai modulus *torsi*.



**Gambar 3.3** Gaya sejajar dengan permukaan akan menyebabkan permukaan benda bergeser sehingga timbul tegangan geser. Gaya yang dikerahkan tangan menuju ke kanan.



### Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Untuk mengamati tegangan dan regangan geser suatu benda dapat digunakan teknik holografi. Bersama temanmu coba kalian cari informasi tentang penggunaan holografi untuk mengamati pergeseran suatu benda. Kalian dapat memanfaatkan internet atau sumber-sumber lain.



### Contoh Soal 1

Sebuah batang besi jari-jari 9 mm dan panjangnya 80 cm. Batang ditarik oleh gaya sebesar  $6 \times 10^4$  N. (Tegangan patah besi  $4 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>)

- Berapakah tegangan tarik pada batang?
- Berapakah perubahan panjang batang? Apakah besi patah?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

Panjang besi =  $L = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$

Luas penampang besi =  $A = \pi r^2 = 3,14(9)^2 \text{ m}^2$

*Jawab :*

Tegangan tarik yang dialami besi:

$$\frac{F}{A} = \frac{6 \times 10^4 \text{ N}}{(3,14)(9 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2} = 2,3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Perubahan panjang besi

$$\Delta L = \frac{(F/A)L}{G} = \frac{(2,3 \times 10^8 \text{ N/m}^2) 0,8 \text{ m}}{2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2} = 9,2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Besi belum patah karena tegangan tarik besi masih di bawah tegangan patahnya.



### Contoh Soal 2

Tulang orang dewasa memiliki diameter minimum 2,8 cm. Berapa gaya maksimal yang boleh menekan tulang agar tidak patah?

**Penyelesaian :**

Tegangan patah tulang adalah  $270 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>.

Gaya yang menghasilkan tegangan tekan sebesar tegangan patah tulang adalah

$$\begin{aligned} F &= \text{Tegangan patah} \times \text{luas penampang} \\ F &= (270 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(\pi)(1,4 \times 10^{-2} \text{ m})^2 \\ &= 1662 \times 10^4 \text{ N} \end{aligned}$$



Tabel (3.1). Sifat Elastis Berbagai Bahan

Bahan	Modulus Young ( $10^9 \text{ N/m}^2$ )	Kekuatan tarik ( $10^6 \text{ N/m}^2$ )	Kekuatan tekan ( $10^6 \text{ N/m}^2$ )
Alumunium	70	90	
Tulang			
Tarik	16	200	
Tekan	9		270
Kuningan	90	370	
Beton	23	2	17
Tembaga	110	230	
Timah hitam	16	12	
Baja	200	520	520

Sumber : Tipler



### Contoh Soal 3

Otot bisep memiliki luas penampang maksimum  $12 \text{ cm}^2$ . Berapakah tegangan otot saat mengangkat beban  $250 \text{ N}$ ?

**Penyelesaian :**

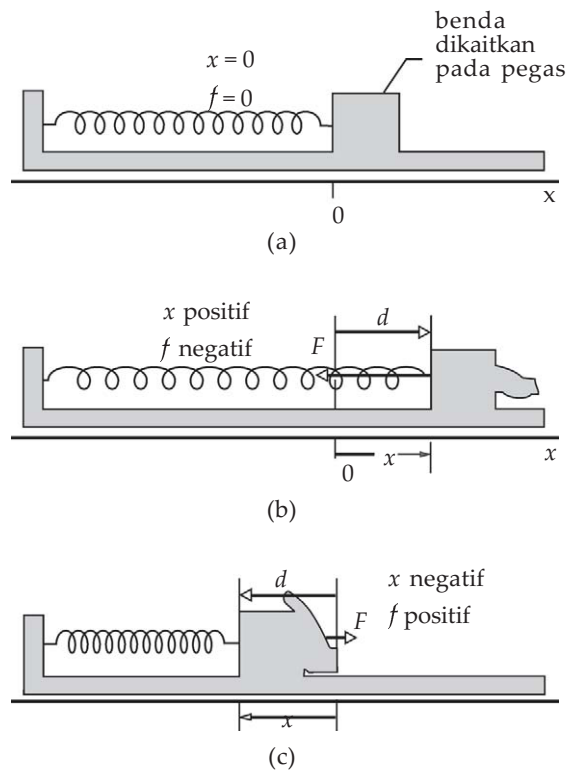
Besar tegangan tarik

$$\text{Tegangan} = \frac{F}{A} = \frac{250 \text{ N}}{12 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2,1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Dari contoh 3 tersebut di atas dapat kita lihat, apabila luas penampang lebih besar maka otot dapat melakukan gaya yang lebih besar. Tegangan maksimum yang dapat diberikan untuk semua otot kurang lebih sama.

## D. Hukum Hooke

Pernahkah kalian melihat sebuah pegas? Gambar pegas ditunjukkan pada gambar berikut ini. Jika pada ujung pegas kita sambungkan dengan sebuah benda bermassa  $m$ , letak massa  $m$  tadi atau ujung pegas kita beri tanda sebagai  $x = 0$ , lalu benda kita tarik sehingga bergeser posisinya sejauh  $x$ . Apa yang terasa di tangan?



**Gambar 3.4** Gambar (a) pegas normal, (b) pegas teregang, (c) pegas tertekan.

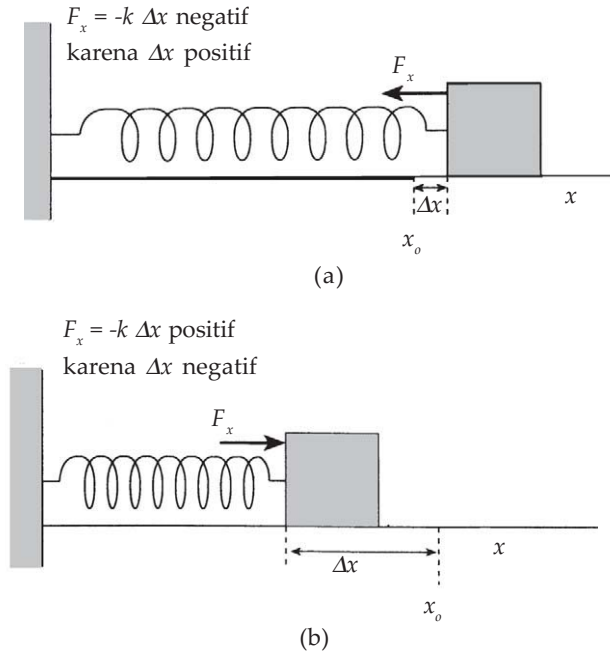
Tangan akan merasakan adanya tarikan dari pegas. Bagaimana kalau pegas kita tekan, kita akan merasakan dorongan dari pegas pada tangan kita. Gaya semacam itu dinamakan gaya pemulih karena gaya itu cenderung memulihkan atau mengembalikan pegas ke keadaan awalnya. Besarnya gaya yang dilakukan oleh pegas adalah dinyatakan oleh hukum Hooke yaitu:

$$F_x = -k\Delta x = -k(x - x_0) \quad \dots (6)$$

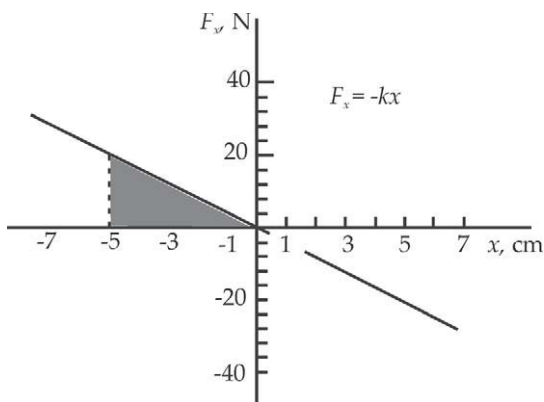
Tanda negatif menunjukkan gaya pegas selalu menuju ke titik kesetimbangannya, dan  $k$  dinamakan konstanta gaya pegas, memiliki satuan gaya dibagi satuan panjang, N/m. Jika pegas diregangkan  $\Delta x$  positif maka gaya yang dikerahkan pegas negatif, bila ditekan  $\Delta x$  negatif, maka gaya yang dikerahkan pegas positif. Bila kita ambil  $x_0 = 0$  maka persamaan di atas menjadi:

$$F_x = -kx = -k(x)$$

.... (7)



**Gambar 3.5** (a) Gambar pegas dan gayanya pegas akan meregang atau menyusut. (b) Pegas akan mengerahkan gaya agar kembali ke tempat semula.



**Gambar 3.6** Menunjukkan grafik  $F$  dengan  $x$ . Besar konstanta pegas adalah kemiringan  $F$  dengan  $x$ . Besar  $F$  sebanding dengan besar  $x$ , atau sebanding dengan pergeserannya.

Konstanta pegas menunjukkan perbandingan antara gaya dengan  $x$ . Selama gaya tidak melampaui titik patah maka besarnya gaya sebanding dengan perubahan panjang pegas. Semakin besar kita meregangkan pegas semakin besar pula gaya yang dikerahkan pegas. Semakin besar kita menekan pegas, semakin besar gaya yang dilakukan oleh pegas.



#### Contoh Soal 4

Sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas 40 N/m ditekan sehingga pegas yang panjang 5 cm menjadi 2 cm. Berapa besar gaya pegas?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$k = 40 \text{ N/m}$$

$$x_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

$$x_2 = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$\Delta x = 0,02 \text{ m} - 0,05 \text{ m} = -0,03 \text{ m}$$

*Jawab :*

$$\text{Besar gaya pegas } F = -k\Delta x = (-40 \text{ N/m})(-0,03 \text{ m}) = 1,2 \text{ N}$$

Besar gaya yang dilakukan oleh pegas adalah 1,2 N. Gaya yang harus dikerahkan dari luar agar pegas tertekan sebesar 2 cm adalah sebesar 1,2 N arahnya berlawanan dengan gaya pegas.



#### Contoh Soal 5

Berapa gaya yang dikerahkan agar sebuah pegas dengan konstanta pegas 40 N/m yang panjang mula-mula 5 cm menjadi 7 cm?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$k = 40 \text{ N/m},$$

$$x_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m},$$

$$x_2 = 7 \text{ cm} = 0,07 \text{ m},$$

$$\Delta x = 0,07 \text{ m} - 0,05 \text{ m} = 0,02 \text{ m}$$

*Jawab :*

$$\text{Besar gaya pegas } F = -k\Delta x = (-40 \text{ N/m})(0,02 \text{ m}) = -0,8 \text{ N}$$

Gaya yang harus dikerahkan agar pegas meregang besarnya sama dengan gaya pegas tetapi berlawanan arah. Besar gaya yang harus dikerahkan 0,8 N.



## Contoh Soal 6

Sebuah pegas panjang 5 cm. Bila pegas diregangkan oleh gaya sebesar 5 N panjangnya menjadi 7 cm, berapa gaya yang harus dikerahkan agar panjang pegas menjadi 10 cm?

Bila pegas tadi digantung kemudian di ujung yang bebas digantungkan benda bermassa 2 kg, berapakah panjang pegas sekarang?

### **Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$x_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m},$$

$$x_2 = 0,07 \text{ m},$$

$$x_3 = 0,1 \text{ m}, F = 5 \text{ N}$$

$$\Delta x_1 = x_2 - x_1 = 0,07 \text{ m} - 0,05 \text{ m} = 0,02 \text{ m}$$

$$\Delta x_2 = x_3 - x_1 = 0,1 \text{ m} - 0,05 \text{ m} = 0,05 \text{ m}$$

*Jawab :*

Besarnya gaya untuk mengubah panjang pegas sebesar 0,02 m adalah 5 N. Maka besarnya konstanta pegas adalah:

$$\begin{aligned} k &= \frac{F}{\Delta x} \\ &= \frac{5}{0,02} \\ &= 250 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Gaya yang dikerahkan pegas agar panjangnya menjadi 10 cm

$$F = -(250 \text{ N})(0,05 \text{ m}) = -12,5 \text{ N}$$

Maka gaya yang harus dikerahkan dari luar agar panjangnya menjadi 0,1 m adalah 12,5 N.

Pegas diberi beban 0,2 kg, maka pegas mendapat gaya sebesar berat beban

$$\begin{aligned} W &= mg \\ &= (0,2)(9,8) \\ &= 1,96 \text{ N}. \end{aligned}$$

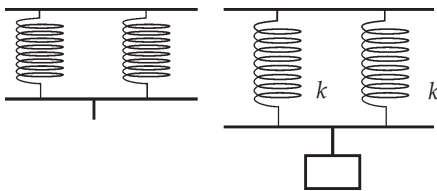
Perubahan panjang pegas

$$\begin{aligned}\Delta k &= \frac{F}{k} \\ &= \frac{19,6 \text{ N}}{250 \text{ N/m}} \\ &= 0,008 \text{ m},\end{aligned}$$

maka panjang pegas sekarang adalah

$$\begin{aligned}x_1 + \Delta x &= 0,05 \text{ m} + 0,008 \text{ m} \\ &= 0,058 \text{ m} \\ &= 5,8 \text{ cm}.\end{aligned}$$

## 1. Pegas Disusun Paralel



**Gambar 3.7** Pegas disusun paralel mula-mula tanpa beban lalu diberi beban, pegas akan bertambah panjang. Masing-masing pegas memiliki konstanta pegas  $k$ . Agar sistem bertambah panjang sebesar  $x$  maka gaya yang dikerahkan adalah  $2F$  sehingga konstanta pegas yang baru adalah  $K = 2k$ .

Sebuah sistem pegas terdiri atas berbagai pegas yang disusun. Pegas dapat disusun secara seri atau paralel. Berapakah konstanta pegas dari sistem pegas yang terdiri atas 2 pegas disusun paralel jika masing-masing pegas memiliki konstanta pegas  $k$ ?

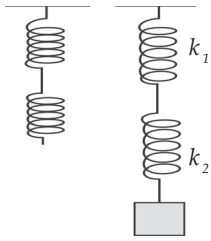
Jika hanya 1 pegas, maka gaya yang diperlukan agar pegas meregang sejauh  $x$  adalah  $F=kx$ . Jika pegas disusun paralel maka gaya yang diperlukan untuk menarik pegas agar meregang sejauh  $x$  yang sama menjadi 2 kali lipat, sehingga

$$\begin{aligned}F_t &= 2F \\ &= 2 kx = Kx\end{aligned}\quad \dots \quad (8)$$

Maka besarnya konstanta pegas yang baru adalah  $K$  adalah  $2 k$ .

## 2. Pegas Disusun Seri

Bagaimana sekarang jika kita memiliki dua buah pegas yang memiliki konstanta pegas yang sama besar yaitu  $k$  lalu kita susun secara seri. Masing-masing pegas jika ditarik dengan gaya sebesar  $F$  akan meregang sebesar  $x$ . Sistem dua



**Gambar 3.8** Pegas disusun seri. Gaya  $F$  menarik pegas maka masing-masing pegas meregang sejauh  $l$  sehingga total jarak  $2x$ . Sehingga konstanta pegas yang baru  $K = k/2$

pegas ini ditarik dengan gaya yang sama yaitu  $F$  maka pertambahan panjang menjadi  $2x$ . Gaya  $F$  akan menarik pegas pertama sehingga bertambah panjang sebesar  $x$ , dan pegas pertama meneruskan gaya sehingga menarik pegas kedua dengan gaya  $F$  yang sama, sehingga total pertambahan panjang adalah  $2x$

$$F_t = F = K(2x)$$

$$K = \frac{F}{2x} = \frac{k}{2} \quad \dots (9)$$



### Contoh Soal 7

Dua buah pegas disusun paralel. Masing-masing pegas memiliki konstanta pegas sebesar 200 N/m. Bila pegas digantungkan secara vertikal kemudian di ujungnya dibebani benda bermassa 2 kg. Berapa pertambahan panjang pegas? Bagaimana jika pegas disusun seri?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$k = 200 \text{ N/m},$$

$$m = 2 \text{ kg}$$

*Jawab :*

Pegas dibebani massa 2 kg, maka pegas mendapat gaya sebesar berat massa

$$W = mg = (2)(9,8) = 19,6 \text{ N}.$$

Karena disusun paralel maka sistem dua pegas memiliki konstanta pegas yang baru sebesar :  $K = 2k = (2)(200) = 400 \text{ N/m}$

Perubahan panjang pegas adalah:

$$\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{19,6 \text{ N}}{400 \text{ N/m}} = 0,05 \text{ m}$$

Bila pegas digantung secara seri maka besarnya konstanta pegas yang baru adalah  $k/2 = 100 \text{ N/m}$ . Perubahan panjang pegas adalah:

$$\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{19,6 \text{ N}}{100 \text{ N/m}} = 0,196 \text{ m}$$





## Life Skills : Kecakapan Akademik

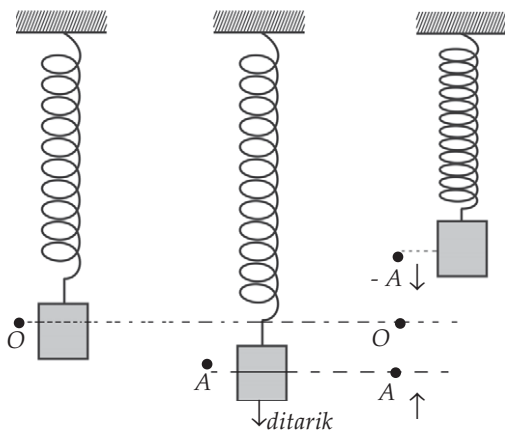
Dari contoh soal di atas kita telah mendapatkan jika pegas disusun paralel dan diberi beban sebesar 2 kg pertambahan panjang pegas adalah 0,05 m. Jika pegas di atas disusun seri berapa massa beban yang harus digantungkan jika kita ingin pertambahannya panjangnya sama dengan saat disusun paralel ?

### E. Osilasi

Kalau benda bermassa di ujung pegas kita tarik sejauh  $A$  lalu kita lepas apa yang terjadi? Benda tadi akan ditarik gaya pegas melewati  $x = 0$  lalu menuju ke  $A$  negatif, benda akan berbalik arah di  $x = -A$  dan kembali melewati  $x = 0$  lalu ke  $x = A$  dan berbalik arah. Bila dasar yang digunakan untuk meletakkan pegas dan massa adalah permukaan yang licin, maka massa akan bergerak bolak-balik tanpa berhenti atau dapat dikatakan benda berosilasi. Jarak sejauh  $A$  disebut sebagai amplitudo atau simpangan maksimum benda, titik  $x = 0$  disebut titik kesetimbangan, arah gerakan selalu melewati titik kesetimbangan.

Waktu yang digunakan massa untuk melakukan satu osilasi disebut *periode* diberi simbol  $T$ . Banyaknya osilasi tiap detik diberi nama frekuensi dengan simbol  $f$ . Hubungan antara periode dan frekuensi adalah:

$$f = \frac{1}{T} \quad \dots (10)$$



**Gambar 3.9** Satu osilasi adalah gerak dari AOBOA, arah percepatan berlawanan dengan arah gerak

Dengan demikian,  $f$  adalah frekuensi osilasi. Satu kali osilasi adalah gerakan dari titik awal melewati titik kesetimbangan ke simpangan maksimum di ujung lain dan kembali ke titik awal dengan melewati titik kesetimbangan.

Sekarang kita akan meninjau gaya yang bekerja pada benda bergerak karena dipengaruhi oleh gaya pegas, bagaimana percepatan dan kecepatannya? Bukankah menurut hukum Newton gaya akan menyebabkan benda mengalami percepatan? Kita bisa

menuliskan gaya yang bekerja pada massa yang terikat pada pegas sebagai berikut:

$$F = ma$$

$$F = -kx = ma$$

$$a = -\frac{kx}{m} \quad \dots \quad (11)$$

Percepatan yang dialami benda berubah-ubah menurut posisinya. Kalian bisa melihatnya dari persamaan (11),  $a$  bergantung pada  $x$ . Percepatannya berbanding lurus dengan simpangan dan arahnya berlawanan dengan simpangannya. Kalian lihat tanda pada persamaan (11) adalah minus, bukan? Ini adalah sifat umum *gerak harmonik sederhana*.

Percepatan adalah turunan kedua posisi maka kita dapat menuliskan persamaan (11) menjadi

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{kx}{m} \quad \dots \quad (12)$$

Simpangan setiap saat atau posisi massa setiap saat yaitu  $x$  dapat dituliskan sebagai fungsi berikut

$$x = A \cos(\omega t + \delta) \quad \dots \quad (13)$$

Cobalah masukkan fungsi persamaan (13) ke persamaan (12), anda akan membuktikan bahwa persamaan (13) merupakan penyelesaian persamaan (12). Persamaan (12) disebut juga persamaan diferensial.

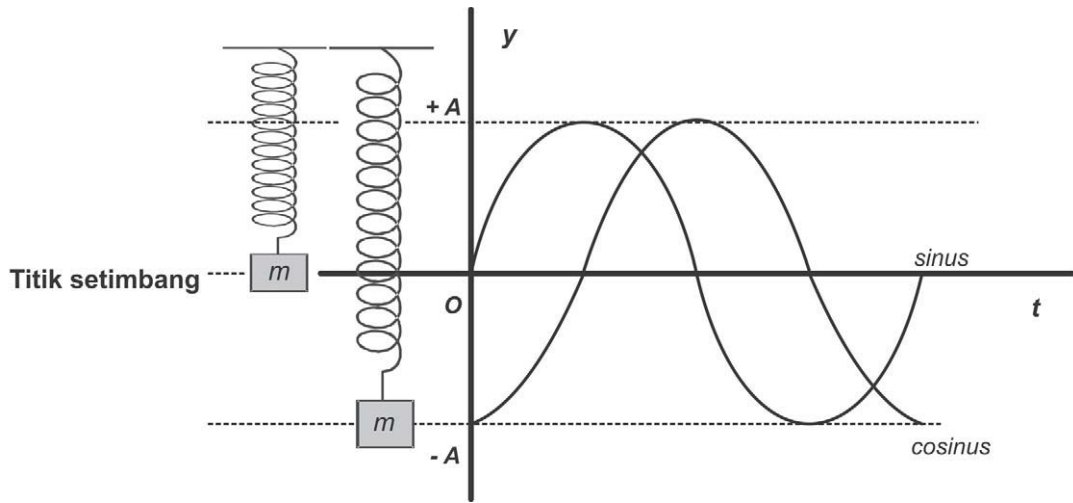
Fungsi tersebut merupakan penyelesaian persamaan (12). Grafik posisi, kecepatan dan percepatan massa di ujung pegas dapat dilihat pada Gambar (3.10), dengan  $\omega$  adalah frekuensi sudut  $= 2\pi f$ , dan  $\delta$  adalah konstanta fase,  $A$  adalah amplitudo atau simpangan maksimum. Nilai  $\omega$  adalah:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \dots \quad (14)$$

Kaitan antara frekuensi dan frekuensi sudut adalah:

$$\omega = 2\pi f \quad \dots \quad (15)$$

Fungsi dapat berupa fungsi cosinus atau sinus tergantung pada di mana massa saat  $t = 0$ . Perhatikan gambar di bawah ini!



**Gambar 3.10** Pegas pada keadaan diam diberi gaya sesaat sehingga tertekan sejauh  $x$  cm. Maka saat mula-mula simpangan pegas adalah 0, maka kita menggunakan fungsi Sinus. Jika keadaan awal pegas kita tekan, kemudian kita lepaskan maka pada keadaan awal simpangannya  $x$  cm, maka kita gunakan fungsi cosinus.

Bila mula-mula atau saat  $t = 0$  massa kita simpangkan sejauh  $x$ , maka fungsinya adalah fungsi cosinus. Ingatlah nilai  $\cos 0$  adalah 1, sehingga simpangannya saat itu sebesar amplitudonya  $A$ . Bila saat mula-mula kita pukul massa dengan gaya sesaat maka kita gunakan fungsi sinus. Ingatlah nilai  $\sin 0$  adalah 0, atau berarti saat  $t = 0$  simpangannya di  $x = 0$ .

Fungsi cosinus dapat juga dinyatakan sebagai fungsi sinus dengan mengingat fungsi  $\cos$  dan  $\sin$  memiliki beda fase  $90^\circ$ .

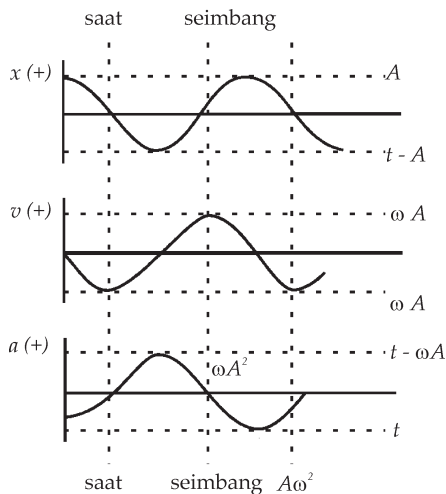
$$X = A \cos \omega t = A \sin (\omega t + 90)$$

Kecepatan partikel setiap saat dapat diperoleh dengan melakukan diferensiasi persamaan (11)

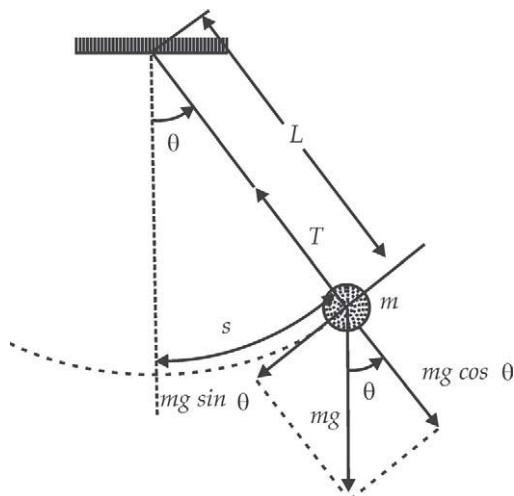
$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d(A \cos (\omega t + \delta))}{dt} = -\omega A \sin (\omega t + \delta)$$

Percepatan partikel setiap saat dapat diperoleh dengan melakukan diferensiasi kecepatan terhadap waktu

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(-\omega A \sin (\omega t + \delta))}{dt} = -A\omega^2 \cos (\omega t + \delta)$$



**Gambar 3.11** Grafik posisi, kecepatan, dan percepatan suatu osilasi



**Gambar 3.12** Bandul yang disimpangkan dengan sudut kecil kemudian dilepas.



Sumber : Penerbit.

**Gambar 3.13** Salah satu contoh gerak osilasi yang sering digunakan sehari-hari adalah gerak ayunan, meskipun ayunan ini lebih rumit dibandingkan ayunan bandul

Percepatan memiliki nilai maksimum sebesar  $A\omega^2$  dan kecepatan maksimum yang dapat dicapai adalah  $A\omega$ . Kecepatan maksimum tercapai pada saat benda berada pada posisi kesetimbangan atau  $x = 0$ , kecepatan minimum terjadi pada simpangan maksimum. Besar percepatan maksimum tercapai pada simpangan maksimum, dan percepatan minimum terjadi pada posisi kesetimbangan.

Sistem massa dan pegas hanyalah salah satu contoh dari gerak harmonik sederhana. Contoh gerak osilasi yang lain adalah bandul yang diayunkan dengan simpangan kecil, perhatikan gerakan bandul dia akan bolak-balik melewati titik tertentu yang tepat berada di bawah titik gantungnya.

Amplitudo osilasi adalah jarak tegak lurus dari titik kesetimbangan. Komponen gaya gravitasi ke arah tangensial partikel menyebabkan terjadi osilasi. Gaya ini selalu menuju ke titik setimbang.

Persamaan pada sistem bandul:

$$F = -mg \sin \theta \quad \dots (16)$$

Bila sudut  $\theta$  kecil,  $\sin \theta \approx \theta \approx s/L$  sehingga persamaan (16) menjadi:

$$F = -mg \frac{s}{L} \quad a = -g \frac{s}{L}$$

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{g}{L}s \quad \dots (17)$$

Bandingkan persamaan (17) dengan persamaan (12). Serupa bukan, dengan  $x$  menjadi  $s$ , dan  $\frac{k}{m}$  menjadi  $\frac{g}{L}$ ,

maka persamaan (17) memiliki penyelesaian seperti persamaan (12) yaitu persamaan (13).

Persamaan (17) memiliki penyelesaian Persamaan (13) dengan:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$



### Contoh Soal 8

Sebuah pegas memiliki konstanta pegas 200 N/m diletakkan mendatar pada permukaan yang licin. Pada ujung pegas diberi massa 4 kg. Pegas diregangkan 5 cm kemudian dilepas. (a) Bagaimanakah posisi massa setiap saat? (b) Berapa frekuensi osilasi pegas? Berapa frekuensi sudut osilasi pegas? (c) Berapa amplitudo osilasi? (d) Selama 3 detik berapa osilasi yang telah dikerjakan massa?

#### **Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$k = 200 \text{ N/m,}$$

$$m = 4 \text{ kg}$$

$$\Delta x = 5 \text{ cm.}$$

*Jawab :*

- a. Dari informasi di atas maka kita bisa mengetahui amplitudo osilasi adalah 5 cm

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{200}{4}} = 7,1 \text{ rad/det}$$

Frekuensi sudut osilasi adalah 7,1 rad/detik. Hati-hati dengan satuan. Satuan sudut tidak dalam derajat tetapi dalam radian.

- b. Frekuensi osilasi pegas  $f = \frac{\omega}{2\pi} = (7,1/2\pi) = 1,1 \text{ Hz}$
- c. Keadaan awal pegas adalah diregangkan, maka fungsi posisi adalah fungsi cosinus. Posisi pegas setiap saat adalah  $x = 0,05 \cos(7,1) \text{ m}$
- d. Periode osilasi adalah  $T = \frac{1}{f} = 0,9 \text{ detik}$  maka selama 3 detik massa melakukan osilasi sebanyak  $3/0,9 = 3,3$  osilasi.



## Ringkasan

### 1. Tegangan tarik

Suatu benda yang ditarik atau ditekan akan mengalami perubahan panjang. Tegangan tarik adalah perbandingan antara gaya digunakan untuk menarik terhadap luas penampang.

$$\text{Tegangan} = \frac{F}{A}$$

Bila gaya yang bekerja berupa gaya tekan maka tegangan yang terjadi disebut tegangan tekan.

Regangan adalah perbandingan antara perubahan panjang benda dengan panjang mula-mula

$$\text{Regangan} = \frac{\Delta L}{L}$$

Tegangan pada saat benda patah disebut tegangan patah.

Perbandingan tegangan terhadap regangan pada daerah grafik yang linear adalah konstan, besarnya konstanta dinamakan *modulus Young* diberi simbol  $Y$ .

$$Y = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

### 2. Tegangan geser

Bila gaya yang diberikan searah dengan arah luasan maka gaya tersebut disebut geser.

Perbandingan gaya geser terhadap luas  $A$  dinamakan *tegangan geser*.

$$\text{Tegangan geser} = \frac{F_s}{A}$$

$$\text{Regangan geser} = \frac{\Delta x}{L} = \tan \theta$$

Perbandingan antara tegangan geser terhadap regangan geser dinamakan modulus geser.

$$M_s = \frac{\text{tegangan geser}}{\text{regangan geser}} = \frac{F_s / A}{\tan \theta}$$

### 3. Hukum Hooke

Sebuah pegas akan mengerahkan gaya yang berlawanan arah dengan perubahan yang diberikan pada pegas.

$$F_x = -k\Delta x = -k(x - x_o)$$

$k$  adalah konstanta pegas, yang memiliki satuan N/m.

Dua buah pegas yang masing-masing memiliki konstanta pegas  $k$ , disusun secara seri sama dengan sebuah pegas dengan konstanta pegas sebesar  $k/2$ .

Dua buah pegas yang masing-masing memiliki konstanta pegas  $k$ , disusun paralel sama dengan sebuah pegas dengan konstanta pegas sebesar  $2k$ .

### 4. Osilasi

Osilasi adalah gerak bolak-balik dari suatu titik sampai kembali ke titik tersebut berulang-ulang.

Amplitudo adalah simpangan maksimum osilasi.

Frekuensi adalah banyaknya osilasi yang terjadi tiap satuan waktu, satuan frekuensi getaran/det atau Hertz.

Periode adalah waktu yang diperlukan oleh satu kali osilasi. Satuan periode adalah detik.

Fungsi posisi sebagai fungsi waktu berbentuk fungsi sinusoidal

$$x = A \cos (\omega + \delta) \text{ atau}$$

$$x = A \sin (\omega t + \delta)$$

Kaitan antara frekuensi dan periode

$$\text{adalah } f = \frac{1}{T}$$

Osilasi yang terjadi pada sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas  $k$  dan dihubungkan dengan massa  $m$  memiliki kecepatan sudut sebesar

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \omega = 2\pi f$$

Kecepatan maksimum massa akan dicapai pada titik kesetimbangan. Pada simpangan maksimumnya kecepatannya nol. Percepatan massa selalu mengarah pada titik kesetimbangan. Percepatan maksimum terjadi pada simpangan maksimum.

Osilasi yang terjadi pada sebuah bandul bermassa  $m$  yang digantungkan pada tali yang panjangnya  $l$  memiliki frekuensi sudut sebesar

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

Dengan  $g$  adalah percepatan gravitasi di tempat itu.



## Uji Kompetensi

**Kerjakan di buku tugas kalian!**

- A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!**
- Sebuah pegas dengan panjang mula-mula 10 cm kemudian diberi beban ternyata panjangnya menjadi 12 cm. Besarnya regangan pegas adalah ....
    - 0,2
    - 0,2 cm
    - 0,2 N
    - 1,2 cm
    - 2 cm

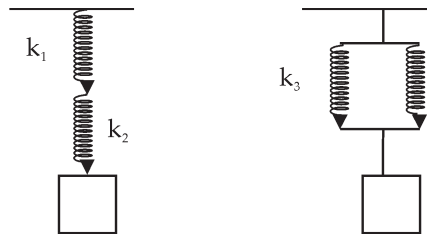


2. Kawat tembaga memiliki luas penampang  $2 \text{ mm}^2$ .  
 $Y = 12 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ . Kawat tersebut diregangkan oleh gaya  $16 \times 10^6 \text{ dyne}$ . Jika panjang mula-mula  $30 \text{ cm}$ , maka pertambahan panjang kawat adalah ....
- $2 \times 10^{-4} \text{ cm}$
  - $2 \times 10^{-3} \text{ cm}$
  - $2 \times 10^{-2} \text{ cm}$
  - $2 \times 10^{-1} \text{ cm}$
  - $2 \text{ cm}$
3. Dua buah kawat  $x$  dan  $Y$  panjang masing-masing  $2 \text{ m}$  dan  $1 \text{ m}$ . Kedua kawat ditarik dengan gaya yang sama sehingga terjadi penambahan panjang masing-masing  $1 \text{ mm}$  dan  $0,5 \text{ mm}$ . Jika diameter kawat  $y$  sama dengan 2 kali diameter kawat  $x$ , maka perbandingan modulus Young kawat  $y$  terhadap kawat  $x$  adalah ....
- 1:1
  - 1:2
  - 2:1
  - 1:4
  - 4:1
4. Sebuah pegas digantungi beban bermassa  $m$ . Jika  $x$  adalah pertambahan panjang pegas, maka periode benda jika dibiarkan bergerak adalah ....
- $2\pi \sqrt{\frac{mx}{g}}$
  - $\pi \sqrt{\frac{mx}{g}}$
  - $2\pi \sqrt{\frac{x}{g}}$
  - $\frac{1}{x} \sqrt{mg}$
  - $\pi m \sqrt{\frac{g}{x}}$

5. Sebuah benda melakukan getaran harmonis dengan amplitudo  $A$ . Pada saat kecepatannya sama dengan setengah kecepatan maksimum maka simpangannya ....  
 A. Nol  
 B.  $0,5 A$   
 C.  $0,64 A$   
 D.  $0,87 A$   
 E.  $A$
6. Seorang anak berayun dengan tali yang panjangnya  $2,5 \text{ m}$  dan  $g=10 \text{ m/det}^2$ . Besar frekuensi ayunan adalah ....  
 A.  $1/\pi$   
 B.  $\pi/2 \text{ Hz}$   
 C.  $\pi \text{ Hz}$   
 D.  $1/\pi \text{ Hz}$   
 E.  $3,8 \text{ Hz}$
7. Periode ayunan sederhana dengan panjang tali  $l$  adalah  $T$  detik. Apabila kita ingin memperoleh perioda dua kali semula, maka panjang tali yang digunakan menjadi ... kali.  
 A. 2  
 B. 4  
 C. 8  
 D. 12  
 E. 16
8. Dalam getaran harmonis, kecepatan getaran adalah ....  
 A. selalu sebanding dengan simpangannya  
 B. tidak tergantung pada simpangannya  
 C. berbanding lurus dengan sudut fasenya  
 D. berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensinya  
 E. tidak bergantung pada amplitudo
9. Sebuah getaran harmonis mempunyai persamaan simpangan :  $Y= 20 \sin 10 \pi t$ . ,  $Y$  dalam cm. Besar amplitudo dan frekuensinya adalah ....  
 A.  $20 \text{ cm}$  dan  $10 \text{ Hz}$   
 B.  $20 \text{ cm}$  dan  $20 \text{ Hz}$   
 C.  $20 \text{ cm}$  dan  $5 \text{ Hz}$   
 D.  $5 \text{ cm}$  dan  $5 \text{ Hz}$   
 E.  $10 \text{ cm}$  dan  $10 \text{ Hz}$

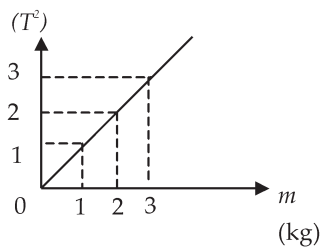
10. Kecepatan sebuah benda bergetar harmonis adalah ....
- A. tetap
  - B. terbesar pada simpangan terbesar
  - C. terbesar pada simpangan terkecil
  - D. tidak tergantung pada frekuensi
  - E. tidak tergantung pada simpangan
11. Sebuah partikel bergerak harmonik dengan periode 6 detik dan amplitudo 10 cm. Kelajuan partikel pada saat berada 5 cm dari titik setimbangnya adalah ....
- A. 7,09 cm/det
  - B. 8,51 cm/det
  - C. 10,07 cm/det
  - D. 11,07 cm/det
  - E. 19,12 cm/det
12. Sebuah pegas yang panjangnya 20 cm digantungkan vertikal. Kemudian ujung bawahnya diberi beban 200 gram sehingga panjangnya bertambah 10 cm. Beban ditarik 5 cm ke bawah kemudian dilepas hingga beban bergetar harmonik. Jika  $g=10 \text{ m/det}^2$ , maka frekuensi getaran adalah ....
- A. 0,5 Hz
  - B. 1,6 Hz
  - C. 5,0 Hz
  - D. 18,8 Hz
  - E. 62,8 Hz
13. Suatu getaran harmonis dinyatakan dalam persamaan  $y= 10 \sin 5t$  dimana  $y$  adalah simpangan dalam satuan cm dan  $t$  dalam detik. Kecepatan maksimum getaran harmonik tersebut adalah ....
- A. 0,5 cm/det
  - B. 2 cm/det
  - C. 10 cm/det
  - D. 20 cm/det
  - E. 50 cm/det

14. Pegas disusun seri dan paralel disusun seperti pada gambar di bawah ini



Ujung pegas digantungi beban yang sama besar. Bila konstanta pegas  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4$ , maka perbandingan periode susunan seri dan paralel adalah ....

- A. 5:4  
B. 2:1  
C. 3:2  
D. 1:2  
E. 2:3
15. Seorang anak massanya 50 kg, bergantung pada ujung sebuah pegas, ternyata pegas bertambah panjang 10 cm. Dengan demikian tetapan pegas bernilai ....
- A. 5 N/m  
B. 20 N/m  
C. 50 N/m  
D. 500 N/m  
E. 5000 N/m
16. Grafik di bawah ini menyatakan hubungan  $T^2$  terhadap  $m$  dari suatu percobaan getaran pegas.  $T$  adalah periode getaran,  $m$  adalah massa beban. Jika dua pegas  $A$  disusun paralel, maka konstanta pegas gabungan adalah ....

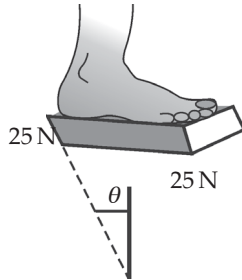


- A.  $4 \text{ Nm}^{-1}$ .  
B.  $8 \pi^2 \text{ Nm}^{-1}$   
C.  $8 \text{ Nm}^{-1}$ .  
D.  $8 \pi^2 \text{ Nm}^{-1}$ .  
E.  $20 \text{ Nm}^{-1}$ .

**B. Kerjakan soal di bawah ini!**

1. Sebuah bola bermassa 25 kg digantungkan pada sebuah kawat baja yang panjangnya 5 m dan jari-jarinya 2 mm. Berapakah pertambahan panjang kawat?

2.



Apabila kaki seorang pelari menyentuh tanah, gaya geser yang bekerja pada tanah setebal 8 mm adalah seperti pada gambar di samping. Jika gaya 25 N didistribusikan pada luas  $15 \text{ cm}^2$ , carilah sudut geser  $\theta$  bila modulus geser tanah  $1,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .

3. Sebuah benda bermassa 2 kg dihubungkan pada suatu pegas horisontal dengan konstanta pegas  $k = 5 \text{ kN/m}$ . Pegas diregangkan dari titik kesetimbangan dan dilepas. Carilah:
- frekuensi osilasi
  - periode
  - amplitudo
  - kecepatan maksimum
  - percepatan maksimum
  - kapan benda pertama kali mencapai posisi kesetimbangan?
4. Sebuah benda bermassa 4 kg dihubungkan pada suatu pegas horisontal. Pegas tersebut disimpangkan dengan amplitudo 10 cm dan berosilasi dengan frekuensi 2 Hz.
- Berapakah konstanta pegas?
  - Berapakah periode gerak ?
  - Berapakah kecepatan maksimum benda?
  - Berapakah percepatan maksimumnya?

5. Sebuah benda berosilasi dengan amplitudo 6 cm pada pegas horisontal yang memiliki konstanta pegas 2 kN/m. Laju maksimumnya 2,2 m/detik. Carilah:
- massa benda
  - frekuensi
  - periode gerak



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. elastisitas,
2. tegangan dan regangan,
3. tegangan dan regangan geser,
4. hukum Hooke, dan
5. osilasi.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab IV

# Usaha dan Energi

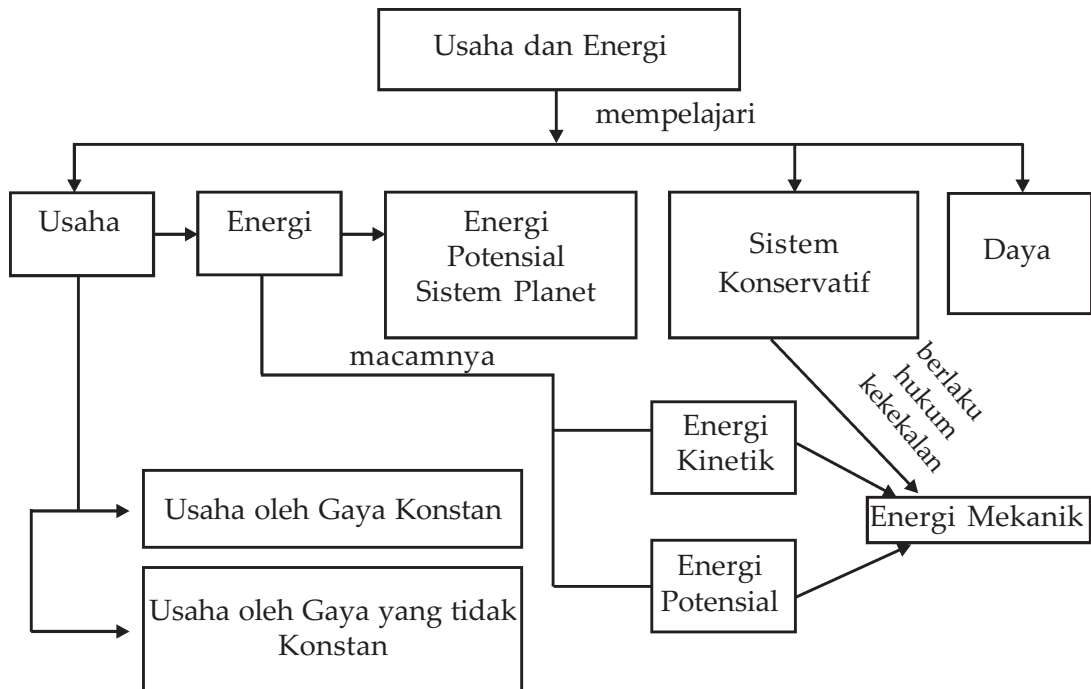


Sumber : Internet : home.net

*Kita membutuhkan energi untuk melakukan usaha atau kerja. Usaha adalah segala kegiatan untuk mencapai tujuan. Pada saat kita mendorong mobil dengan suatu gaya tertentu, maka tujuan kita dapat tercapai yaitu mobil dapat bergerak.*



# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian dapat :

1. menunjukkan hubungan antara usaha dan gaya, dan
2. menganalisis hubungan antara usaha dan gaya serta perubahan energi dan hukum kekekalan energi mekanik.



## Motivasi Belajar

Usaha dapat disebut sebagai kerja, yaitu merupakan segala kegiatan yang dilakukan untuk mencapai tujuan. Energi atau tenaga adalah kemampuan dalam melakukan kerja. Bagaimanakah usaha dan energi yang sebenarnya itu? Apa saja bentuk usaha dan energi dalam kehidupan sehari-hari? Untuk memahaminya, maka pelajailah materi bab ini dengan saksama.



## Kata-kata Kunci

usaha, energi, teorema usaha energi, hukum kekekalan energi, sistem konservatif, daya

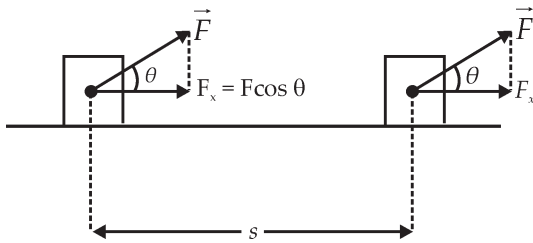
Pada bab ini akan kita bahas tentang usaha, hal-hal yang dapat membangkitkan usaha, dan usaha yang berkaitan dengan perubahan energi. Usaha yang dilakukan sama dengan perubahan energi kinetik. Di samping energi kinetik terdapat energi potensial. Energi kinetik dan energi potensial membentuk energi mekanik. Energi mekanik akan kekal pada sistem yang konservatif, kita mengenalnya sebagai hukum kekekalan energi mekanik. Dengan menggunakan hukum kekekalan mekanik ini kita dapat menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari.

## A. Usaha

Apakah usaha itu? Kita sering mendengar istilah usaha, misalnya Tuti melakukan usaha yang besar agar lulus ujian. Usaha yang dilakukan Rudi untuk mendorong lemari 5 Joule. Ternyata pengertian usaha dalam Fisika berbeda dengan usaha yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Usaha dapat ditimbulkan oleh gaya yang konstan, dan juga gaya yang tidak konstan.

## 1. Usaha oleh Gaya Konstan

Toni mendorong sebuah balok, dia mengerahkan gaya konstan sebesar  $F$  Newton, ternyata balok bergeser sejauh  $s$  meter searah dengan  $F$ . Kita bisa menghitung besarnya usaha  $W$  adalah (Tipler).



Gambar 4.1 Gaya  $F$  mengakibatkan pergeseran sejauh  $S$

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} \quad \dots \quad (1)$$

Apabila pergeseran tidak searah dengan arah  $\vec{F}$  maka yang akan kita gunakan adalah komponen gaya pada arah pergeseran. Masih ingatkah kalian tentang perkalian antara dua buah vektor? Gaya adalah besaran vektor dan pergeseran juga besaran vektor, akan tetapi usaha adalah besaran skalar. Usaha

adalah perkalian saklar antara vektor  $\vec{F}$  dengan vektor pergeseran. Usaha akan maksimal bila  $\vec{F}$  memiliki arah yang sama dengan pergeseran, usaha akan nol (0) bila gaya yang dikerahkan tegak lurus dengan pergeseran. Sebagai contoh pada kasus Toni mendorong balok, karena pergeseran searah dengan  $\vec{F}$  maka besarnya usaha adalah besar  $\vec{F}$  dikalikan besar pergeseran  $s$  atau  $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ .

Gaya  $\vec{F}$  mengakibatkan pergeseran sejauh  $S$ . Besar gaya  $F$  akan mengalami perpindahan sebesar  $F_x = F \cos \theta$ , maka besarnya usaha adalah:

$$\begin{aligned} W &= \vec{F} \cdot \vec{s} \\ &= F \cdot s \cos \theta \end{aligned} \quad \dots \quad (2a)$$

Satuan dari usaha adalah satuan gaya kali jarak atau Newton meter, dalam SI 1 Newton meter = 1 joule. Satuan usaha umumnya adalah joule. Usaha bernilai (+) jika  $\vec{F}$  searah  $\vec{s}$  dan bernilai (-) jika  $\vec{F}$  berlawanan arah dengan  $\vec{s}$ .



### Contoh Soal 1

Sebuah gaya sebesar 15 N horizontal dikerjakan pada sebuah balok sehingga balok bergeser 5 m. Berapakah usaha yang dikerjakan gaya pada balok?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$F = 15 \text{ N}$$

$$s = 5 \text{ m}$$

*Jawab :*

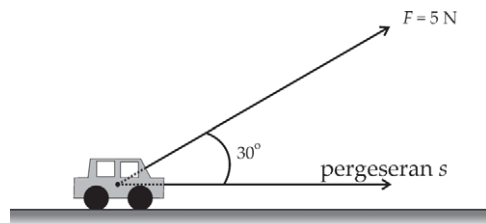
Usaha yang dikerjakan pada balok.

$$W = Fs = (15\text{N}) (5\text{m}) = 75 \text{ J}$$



### Contoh Soal 2

Sebuah truk mainan ditarik oleh gaya 5 N membentuk sudut sebesar  $30^\circ$  terhadap horisontal. Massa truk 1,5 kg. Berapa kerja yang dilakukan bila (a) lantai licin, (b) koefisien gesek kinetisnya 0,2.



**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$F = 5 \text{ N}, \quad \theta = 30^\circ, \quad m = 1,5 \text{ kg}, \quad s = 6 \text{ m}.$$

*Jawab :*

a. besar gaya ke arah horizontal adalah

$$F \cos \theta = (5\text{N})(\cos 30) = 4,3 \text{ N}$$

$$\text{Usaha yang dilakukan } W = (F \cos \theta) (s) = (4,3)(6) = 25,8 \text{ J}.$$

b. bila koefisien gesek kinetis 0,2.

Persamaan pada arah vertikal adalah

$$F \sin \theta + F_n = mg$$

Benda tidak bergerak ke arah vertikal maka percepatan truk = 0. Gaya ke atas sama dengan gaya gravitasi yang ke arah bawah

$$F_n = mg - F \sin \theta = (1,5)(9,8) - (5)(0,5) = 13,2 \text{ N}$$

$$\text{Gaya gesek kinetik} = (0,2)(13,2\text{N}) = 2,62 \text{ N}$$

Gaya total yang bekerja pada truk:

$$F = F \cos \theta - f_s = 4,3 \text{ N} - 2,62 \text{ N} = 1,68 \text{ N}$$

Usaha yang dilakukan pada truk

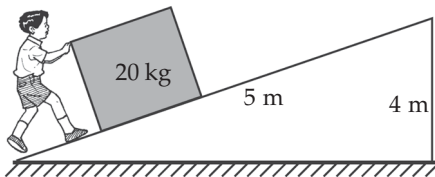
$$W = F_s = (1,68)(6) = 10,08 \text{ J}$$

### Soal Latihan

Seorang anak memiliki mainan yang beratnya 20 N. Oleh karena anak itu tidak mampu mengangkatnya, dia memutuskan untuk menarik mainan tersebut dengan sebuah tali. Anak tersebut menarik mainan dengan gaya sebesar 15 N membentuk sudut sebesar 30 terhadap horizontal. Berapa kerja yang dilakukan bila: a. Lantai licin, b. Koefisien gesek kinetisnya 0,2.



### Contoh Soal 3



Balok bermassa 20 kg dinaikkan dari dasar ke puncak bidang miring yang panjangnya 5 m, dan ketinggiannya 4 m. Bila permukaan licin berapa usaha yang dilakukan oleh sebuah gaya yang sejajar dengan bidang miring agar balok bergerak dengan kecepatan konstan.

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$M = 20 \text{ kg}, \quad s = 5 \text{ m}, \quad h = 4 \text{ m}.$$

*Jawab :*

Agar balok bergerak ke atas dengan kecepatan konstan maka gaya yang dikerahkan sama dengan komponen gaya gravitasi yang sejajar dengan bidang.

$$F = mg \sin \theta = (20)(9,8) (4/5) = 156,8 \text{ N}$$

$$\text{Usaha yang dikerahkan: } F.s = 156,8(5) = 784 \text{ J}.$$



## Keingintahuan

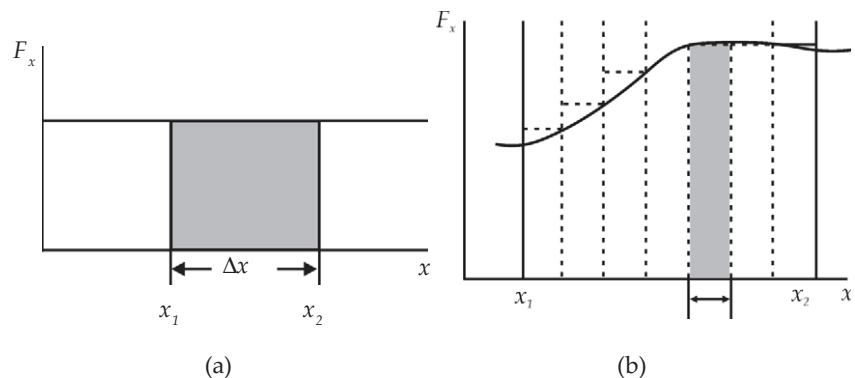
Perhatikan contoh berikut!

Salim mendorong tembok dengan gaya 75 N namun tembok tidak bergerak. Sedangkan Tono mendorong kursi dengan gaya 20 N sehingga kursi bergeser sejauh 3 meter. Apakah benar usaha yang dilakukan Salim lebih besar dari usaha yang dilakukan Tono? Jelaskan!

## 2. Usaha oleh Gaya yang Tidak Konstan

Pada pembelajaran yang lalu kita telah membahas usaha yang dilakukan oleh gaya yang besar dan arahnya konstan. Sekarang, bagaimana kalau gaya yang bekerja pada suatu benda tidak konstan tetapi tergantung pada posisi?

Contoh gaya yang bekerja tergantung pada posisi adalah gaya pegas, gaya gravitasi antarplanet, gaya listrik antara dua buah benda bermuatan, dan sebagainya. Gambar (4.2) menunjukkan grafik gaya terhadap posisi. Kita bisa membagi jarak dari  $x_1$  sampai  $x_2$  menjadi selang yang kecil-kecil.



**Gambar 4.2** gambar (a) jika  $F$  konstan maka usaha adalah  $W=F\Delta x$ . (b) Bila  $F$  sebagai fungsi posisi maka usaha adalah luas dari luasan di bawah kurva  $F$ , yang merupakan jumlah luas seluruh segiempat di bawah kurva  $F$ .

Bila tiap selang gaya yang berubah terhadap posisi cukup kecil dapat kita anggap sebagai sederetan gaya-gaya konstan. Usaha yang dilakukan pada tiap selang adalah luas segiempat di bawah gaya. Jadi, usaha total adalah jumlah seluruh luasan

segiempat. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar (4.2a) dan (4.2b). Dengan demikian kita dapat mengatakan usaha yang dilakukan oleh gaya adalah perubahan yaitu luas di bawah kurva  $F(x)$  terhadap  $x$ .

$$W = \sum_i F_x \Delta x_i \quad \dots (2.b)$$

Jika  $\Delta x$  sangat kecil yaitu sebesar  $dx$ , usaha pada tiap persegi panjang adalah  $dW$ . Usaha total dari  $x_1$  sampai  $x_2$  adalah integral dari titik  $x_1$  sampai  $x_2$ .

$$dW = F_x dx$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x dx \quad \dots (2.c)$$



#### Contoh Soal 4

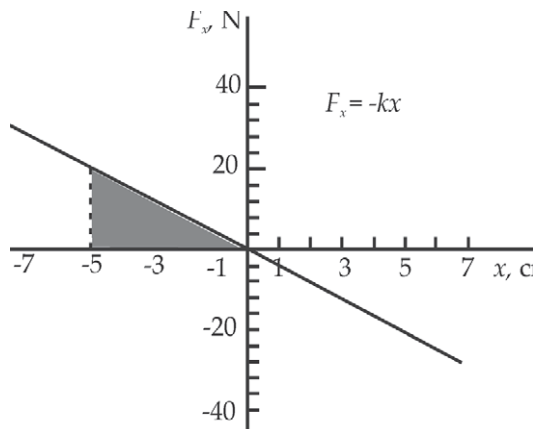
Carilah usaha yang dilakukan oleh pegas yang ujungnya dihubungkan dengan benda bermassa  $m$  yang ditekan sehingga pegas berkurang panjangnya sebesar  $x$  agar pegas kembali ke posisi semula!

##### Penyelesaian :

Gaya pada pegas dapat ditunjukkan oleh Gambar (4.3). Usaha yang dilakukan pegas adalah luasan yang berada di antara grafik fungsi  $F$  dan sumbu  $x$ . Gaya yang dilakukan pegas adalah  $F = -kx$

Luasan di bawah fungsi gaya adalah luasan segitiga. Luas segitiga bisa kita cari yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Luas} &= \frac{1}{2} \text{alas} \times \text{tinggi} \\ &= \frac{1}{2} x \times F(x) = \frac{1}{2} x \times kx = \frac{1}{2} kx^2 \end{aligned}$$



**Gambar 4.3** gambar  $F$  sebagai fungsi  $x$ , usaha yang dikerjakan pegas pada saat meregang sebesar  $x$  adalah bagian yang diarsir.





## Kewirausahaan : Semangat Inovatif & Kreatif

Bentuklah kelompok belajar yang terdiri atas 4-5 siswa (usahakan yang berasal dari daerah yang berbeda). Setelah kalian mempelajari usaha oleh gaya konstan, mestinya kalian berpikir untuk menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya kalian akan mengangkat beban 500 N ke atas gedung yang tingginya 8 meter. Coba buatlah rancangan alat yang memudahkan untuk mengangkat beban ke atas gedung. Uraikan komponen-komponen gayanya bila alat tersebut bekerja.

## B. Energi

Suatu hal yang sangat berhubungan dengan usaha adalah energi. Energi merupakan kemampuan untuk melakukan usaha. Apabila ada beberapa sistem kemudian sebuah sistem pertama memberikan usaha pada sistem kedua, energi akan dipindahkan dari sistem pertama ke sistem kedua.

Sebagai contoh seorang anak mendorong mobil mainan hingga mobil bergerak. Anak itu melakukan usaha pada mobil, sebagian usaha digunakan untuk bergerak atau menjadi tenaga gerak, sebagian digunakan untuk mengatasi gesekan pada lantai, sebagian menjadi tenaga termal (panas) karena gesekan antara roda mobil dan lantai. Pada anak itu sendiri tenaga kimia dalam tubuh berkurang karena digunakan untuk mendorong mobil. Energi berpindah dari tenaga kimia menjadi tenaga gerak dan tenaga termal gesekan. Energi total sebuah sistem dan lingkungannya tidak akan berubah, tetapi hanya terjadi perubahan bentuk energi saja.

Kita akan mempelajari energi kinetik yaitu tenaga karena geraknya, dan juga energi potensial yaitu tenaga karena konfigurasinya. Kita juga akan mempelajari hukum kekekalan tenaga, serta bagaimana energi potensial berubah menjadi energi kinetik dan sebaliknya.

### 1. Energi Kinetik

Mari kita tinjau sebuah benda yang mendapat gaya sebesar  $F$  yang konstan. Benda tadi akan mendapat percepatan sebesar  $F/m$  yang konstan dengan arah sama dengan arah gaya. Pada gerak dengan percepatan konstan maka percepatan rata-

ratanya sama dengan percepatan sesaatnya. Bila arah gaya kita misalkan pada arah  $x$  dan saat  $t = 0$  posisinya adalah 0 ( $x = 0$ ) dan selama  $t$  detik kecepatannya berubah dari  $v_0$  menjadi  $v$  maka percepatannya bisa kita tuliskan sebagai

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad \dots \quad (3)$$

dan

$$x = \left( \frac{v + v_0}{2} \right) t \quad \dots \quad (4)$$

Usaha yang dilakukan adalah:

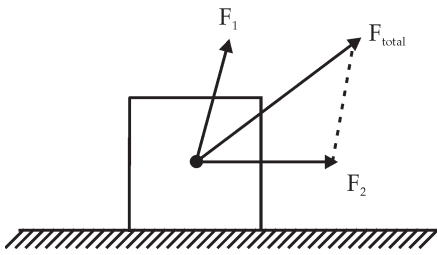
$$\begin{aligned} W &= Fx = max \\ &= m \left( \frac{v - v_0}{t} \right) \left( \frac{v + v_0}{2} \right) t \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 \quad \dots \quad (5)$$

$$W = K - K_0 = \Delta K \quad \dots \quad (6)$$

Setengah hasil kali massa dengan kuadrat kecepatan kita sebut sebagai *tenaga kinetik* benda, seringkali diberi simbol  $K$ .  $K_0 = \frac{1}{2} mv_0^2$  adalah tenaga kinetik awal dan  $K = \frac{1}{2} mv^2$  adalah tenaga kinetik akhir.

Gaya yang bekerja pada suatu benda mungkin tidak hanya satu, bisa 2 atau 3 gaya bekerja pada benda yang sama. Usaha total yang dilakukan adalah usaha karena seluruh gaya yang bekerja pada benda atau resultan gaya atau gaya netto yang bekerja pada benda. Persamaan (5) berlaku dengan  $F$  adalah gaya total. Dengan demikian dari persamaan (5) di atas bisa kita katakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya netto yang bekerja pada benda sama dengan perubahan energi kinetik benda tersebut. Satuan energi kinetik sama dengan satuan usaha yaitu Joule.



**Gambar 4.4** Bila pada benda terdapat lebih dari satu gaya maka usaha total adalah usaha yang dilakukan oleh resultan gaya  $F_{total}=F_1+F_2$  pada arah pergeserannya.

Gaya yang dikerjakan pada benda membuat kecepatan benda berubah. Usaha yang dikerjakan pada benda tersebut mengubah energi kinetik benda. Besarnya usaha selalu sama dengan perubahan energi kinetik benda. Hal ini sering disebut sebagai teorema usaha dan energi.

### **Teorema Usaha Energi**

*Usaha yang dilakukan oleh gaya total pada partikel, selalu sama dengan perubahan tenaga kinetik partikel.*

Apabila energi kinetik akhir partikel lebih besar dari energi kinetik awal, maka usaha dilakukan oleh resultan gaya pada partikel itu. Bagaimana bila energi kinetiknya berkurang? Atau bila tenaga kinetik akhir lebih kecil dari tenaga kinetik awal? Apabila terjadi demikian berarti usaha yang dilakukan pada benda oleh resultan gaya berharga negatif. Pergeseran dan gaya resultannya berlawanan arah. Dapat dikatakan jika sebuah benda yang memiliki energi gerak, kemudian dia melakukan usaha maka gerakannya akan semakin lambat, berarti ia akan kehilangan energinya.



### **Contoh Soal 5**

Perhatikan contoh 2.

Sebuah truk mainan ditarik oleh gaya 5 N membentuk sudut sebesar  $30^\circ$  terhadap horizontal, massa truk 1,5 kg. Berapakah kecepatan benda setelah dikenai gaya jika (a). benda mula-mula diam. (b). truk mula-mula bergerak dengan kecepatan 1,5 m/det.

**Penyelesaian :**

- Usaha yang dilakukan jika lantai licin adalah 25,8 J, maka perubahan tenaga kinetiknya adalah 25,8 J. Truk mula-mula diam maka:

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$25,8 = \frac{1}{2}(1,5\text{kg})v_t^2 - 0$$

$$v_t = \sqrt{\frac{2(25,8)}{1,5}} = 5,9 \text{ m/det}$$

Jadi, kecepatannya adalah 5,9 m/det.

Jika lantai tidak licin koefisien gesekan 0,2 dan usaha yang dilakukan adalah  $W = 10,08 \text{ J}$  truk mula-mula diam maka

$$10,8 \text{ J} = \frac{1}{2}(1,5\text{kg})v_t^2 - 0$$

$$v_t = \sqrt{\frac{2(10,08)}{1,5}} = 3,67 \text{ m/det}$$

Jadi, kecepatannya adalah 3,67 m/det

- b. Bila mula-mula truk bergerak dengan kecepatan konstan 1,5 m/det maka

Jika lantai licin

$$25,8 \text{ J} = \frac{1}{2}(1,5 \text{ kg})v_t^2 - \frac{1}{2}(1,5 \text{ kg})(1,5 \text{ t})^2$$

$$v_t = \sqrt{\frac{2(25,8 - 1,69)}{1,5}} = 5,67 \text{ m/det}$$

Jadi kecepatannya adalah 5,67 m/det

jika koefisien gesek 0,2

$$10,08 \text{ J} = \frac{1}{2}(1,5\text{kg})v_t^2 - \frac{1}{2}(1,5\text{kg})(1,5\text{t})^2$$

$$v_t = \sqrt{\frac{2(10,08 - 1,69)}{1,5}} = 3,34 \text{ m/det}$$

Jadi kecepatannya adalah 3,34 m/det.



### Contoh Soal 6

Sebuah balok bermassa 5 kg mula-mula diam lalu dinaikkan sehingga naik setinggi 4 m oleh suatu gaya vertikal sehingga bergerak ke atas dengan kecepatan konstan. Berapakah usaha yang dilakukan oleh:

- Gaya vertikal
- Gaya gravitasi
- Gaya total
- Berapa perubahan tenaga kinetik benda

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$m = 5 \text{ kg}$$

$$h = 4 \text{ m}$$

*Jawab :*

- Agar bergerak maka benda kita diberi gaya ke atas yang lebih besar dari gaya gravitasi. Kemudian agar balok bergerak ke atas dengan  $v$  konstan, maka besarnya gaya yang menarik ke atas sama dengan gaya gravitasi bumi tetapi arahnya ke atas.

$$F = mg = (5 \text{ kg})(9,8 \text{ m}) = 49 \text{ N}$$

$$W = Fh = (49 \text{ N})(4 \text{ m}) = 196 \text{ J}$$

- Usaha yang dilakukan gaya gravitasi

$$W = -F.h = -196 \text{ J.}$$

Usaha yang dilakukan gaya gravitasi negatif karena berlawanan dengan arah gerak.

- Gaya total yang bekerja = 0. Gaya ke atas sama dengan gaya gravitasi yang ke arah bawah. Maka usaha total adalah nol.
- Perubahan tenaga kinetik = 0, karena usaha total = 0, sehingga kecepatan benda konstan.



### Contoh Soal 7

Perhatikan contoh soal 6.

Bila balok bermassa 5 kg tadi dinaikkan oleh gaya ke atas sebesar 80 N. Carilah

- Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi
- Usaha yang dilakukan gaya vertikal 80 N
- Usaha yang dilakukan gaya total
- Perubahan tenaga kinetik benda

**Penyelesaian :**

Diketahui :

$$m = 5 \text{ kg,}$$

$$h = 4 \text{ m,}$$

Jawab :

- a. Kita ambil arah ke atas adalah bertanda positif dan arah ke bawah adalah bertanda negatif. Balok bergerak dengan kecepatan konstan ke atas. Maka besarnya gaya yang menarik ke atas sama dengan gaya gravitasi bumi tetapi arahnya ke atas. Arah perpindahan juga ke atas.

$$F = mg = (5 \text{ kg}) (9,8 \text{ m}) = 49 \text{ N}$$

$$W = Fh = (49 \text{ N})(4 \text{ m}) = 196 \text{ J}$$

- b. Usaha yang dilakukan gaya gravitasi. Gaya gravitasi berarah ke bawah, sedang perpindahan benda ke atas.

$$W = -Fh = -196 \text{ J.}$$

Usaha yang dilakukan gaya gravitasi negatif karena berlawanan dengan arah gerak.

- c. Gaya total yang bekerja = 0. Gaya ke atas sama dengan gaya gravitasi yang ke arah bawah. Maka usaha total adalah nol.

- d. Perubahan energi kinetik = 0 karena usaha total = 0, maka kecepatan benda konstan.



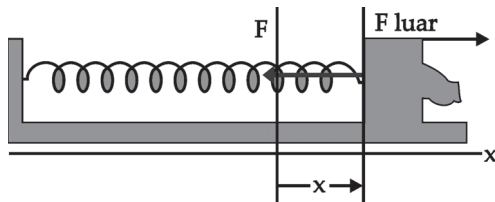
**Life Skills : Kecakapan Sosial**

Energi kinetik banyak dimanfaatkan di perusahaan-perusahaan. Apakah kalian berpikir untuk memanfaatkan energi kinetik dalam kehidupan bermasyarakat? Lakukanlah terutama pada saat kalian melakukan bakti sosial.

## 2. Energi Potensial

### a. Energi Potensial Pegas

Mari kita lihat sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas sebesar  $k$ . Pada ujung pegas diikat sebuah balok bermassa  $m$  diletakkan di lantai yang licin. Massa pegas jauh lebih kecil daripada massa balok. Balok ditarik sehingga panjangnya bertambah sebesar  $x$  secara perlahan-lahan dengan kecepatan konstan. Bagaimana usahanya?



**Gambar 4.5** Pegas diregangkan oleh gaya luar yang menarik pegas sehingga meregang

Gaya yang dikerahkan pegas di samping besarnya  $F = kx$ , arahnya ke kiri, gaya dari luar besarnya  $F_{\text{luar}} = kx$  arahnya ke kanan. Gaya total antara gaya pegas dan gaya luar bernilai nol, dan balok bergerak dengan kecepatan konstan.

Besarnya gaya yang kita kerahkan untuk mengubah panjang pegas dengan balok bergerak dengan kecepatan konstan adalah sama dengan gaya pegas tetapi arahnya berlawanan. Balok yang bergerak dengan kecepatan konstan maka total gayanya nol, sehingga gaya dari luar sama besar tetapi berlawanan arah dengan gaya pegas.

$$\sum F = 0$$

$$F_{\text{pegas}} + F_{\text{luar}} = 0$$

$$F_{\text{pegas}} = -F_{\text{luar}}$$

$$F_{\text{pegas}} = -kx$$

$$F_{\text{luar}} = kx \quad \dots (7)$$

Pegas dan balok membentuk sebuah sistem, yang kita kenal sebagai sistem pegas balok.

Usaha yang dilakukan oleh gaya luar adalah:

$$W_{\text{luar}} = \int_0^x kx dx = \frac{1}{2} kx^2 \quad \dots (8)$$

Usaha yang dilakukan oleh pegas:

$$W_{\text{pegas}} = \int_0^x -kx dx = -\frac{1}{2} kx^2 \quad \dots (9)$$

Usaha yang dikerjakan pada balok adalah usaha pegas ditambah usaha dari gaya luar, usaha totalnya adalah nol. Dengan demikian, perubahan energi kinetik sistem sebesar 0 atau tidak ada perubahan energi kinetik. Usaha total yang dikerahkan pada sistem pegas massa adalah  $W_{\text{luar}}$ . Bedakanlah antara usaha yang dilakukan pada balok dan usaha yang dikerjakan pada sistem massa pegas.



Dengan adanya usaha dari luar posisi balok berubah atau terjadi perubahan konfigurasi. Energi yang berkaitan dengan posisi atau konfigurasi disebut *energi potensial*. Usaha dari luar pada sistem balok pegas di atas tidak menghasilkan perubahan energi kinetik tetapi disimpan sebagai tenaga potensial. Berapa energi potensial akibat gaya luar yang kita keluarkan? Setiap balok yang bergerak posisinya akan berubah dan energi potensialnya juga berubah. Besarnya perubahan energi potensial sama dengan usaha yang dilakukan oleh gaya luar yaitu  $\frac{1}{2} kx^2$ . Bila energi potensial kita sebut  $U$ , maka kita dapat menuliskan

$$\Delta U = W_{\text{luar}} = \frac{1}{2} kx^2$$

$$U(x) - U(0) = \frac{1}{2} kx^2$$

Saat balok di  $x=0$ , kita anggap tenaga potensialnya 0, maka energi potensial pada sistem pegas massa

$$U(x) = \frac{1}{2} kx^2 \quad \dots \quad (10)$$

Sekarang kita mengetahui energi potensial sistem pada setiap posisi balok dengan menggunakan persamaan (10) di atas. Energi potensial maksimal akan dicapai saat balok meregang pada jarak maksimal. Semakin jauh balok kita tarik energi potensial akan semakin besar. Bagaimana bila balok kita dorong sehingga pegas tertekan? Bila pegas tertekan sejauh  $-x$ , maka energi potensial sistem bisa kita cari dengan persamaan (10) hasilnya akan sama dengan balok yang kita regangkan sejauh  $x$ . Jadi energi potensial sistem akan tercapai saat balok tertekan maksimal teregang maksimal.

Jika setelah kita regangkan lalu balok kita lepaskan apa yang akan terjadi? Balok yang kita lepaskan tidak mempunyai gaya luar yang bekerja pada sistem. Gaya yang bekerja pada balok hanyalah gaya pegas, yang berarti gaya pada sistem itu sendiri. Balok yang telah kita regangkan sehingga sistem memiliki energi potensial. Jika kita lepas balok bergerak menuju titik  $x = 0$ , dengan demikian energi potensial berkurang. Ke mana perginya energi potensial tersebut? Energi

potensial tersebut diubah menjadi energi kinetik karena balok bergerak atau memiliki kecepatan menuju  $x = 0$ . Saat balok di posisi  $x$  energi kinetik balok adalah nol karena balok diam. Saat balok mencapai titik  $x = 0$  energi potensialnya telah berkurang dan energi kinetiknya bertambah. Besarnya pengurangan energi potensial sama dengan penambahan energi kinetik sehingga kita dapat menuliskan sebagai

$$\Delta K = -\Delta U \quad \dots \quad (11)$$

Mari kita tinjau gerakan balok selanjutnya, setelah balok sampai di titik  $x = 0$  balok ternyata tetap bergerak sampai pegas tertekan maksimum kemudian balok diam sesaat lalu bergerak berlawanan arah dengan semula kembali menuju titik  $x = 0$ . Saat balok menjauhi titik  $x = 0$  menuju titik pegas tertekan maksimum energi potensial membesar dan energi kinetiknya berkurang. Besarnya pengurangan energi kinetik sama dengan kenaikan energi potensial.

Bagaimana kaitan antara perubahan energi potensial dengan kerja yang dilakukan pada sistem? Kita telah mendapatkan usaha yang dilakukan pada sistem akan mengakibatkan perubahan energi kinetik sebesar  $\Delta K$ . Dari persamaan (6) dan persamaan (11) kita dapatkan:

$$W = \Delta K$$

$$\Delta K = -\Delta U$$

$$W = -\Delta U \quad \dots \quad (12)$$

atau

$$\Delta U = -W$$

Usaha yang dilakukan oleh pegas pada balok sama dengan pengurangan tenaga potensial. Usaha yang dilakukan pegas pada balok adalah usaha yang dilakukan oleh sistem.  $W$  pada persamaan (12) di atas adalah usaha yang dilakukan oleh gaya yang berada pada sistem *bukan* berasal dari gaya luar.

Kita telah menurunkan energi potensial dengan menggunakan usaha dari luar. Sekarang kita dapat mencari energi potensial dengan menggunakan usaha yang dilakukan oleh sistem yang berarti menggunakan gaya pada sistem itu sendiri dengan menggunakan persamaan (12).



### Contoh Soal 8

Sebuah pegas memiliki konstanta pegas sebesar 400 N/m. Pada ujungnya diikatkan balok bermassa 0,5 kg diletakkan mendatar di atas lantai. Pegas disimpangkan sampai sejauh 5 cm. Gesekan antara balok dengan lantai diabaikan.

- Berapa kerja yang dilakukan pegas bila balok bergerak dari  $x = 5$  sampai  $x = 0$  cm?
- Berapa tenaga kinetik saat di  $x = 0$ , berapa tenaga potensial saat di  $x = 0$ ?

**Penyelesaian ;**

*Diketahui :*

$$K = 400 \text{ N/m},$$

$$\Delta x = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}.$$

*Jawab :*

- Balok bergerak dari 5 cm ke posisi setimbang, maka gaya pegas searah dengan pergeseran maka usaha yang dilakukan pegas positif.

Kerja yang dilakukan pegas

$$W = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} (400 \text{ N/m}) (0,05)^2 = 0,5 \text{ J}$$

- Tenaga kinetik saat di  $x = 0$ ,

Pegas mula-mula diregangkan lalu dilepas maka besarnya perubahan tenaga kinetik sama dengan usaha yang dilakukan pegas. Kecepatan awal pegas = 0, sehingga tenaga kinetik mula-mula = 0.

$$W = \Delta K$$

kecepatan balok di  $x = 0$ .

$$\Delta K = K_1 - K_0 = W$$

tenaga kinetik saat di  $x = 0$  adalah 0,5 J

tenaga potensial saat di  $x = 0$  adalah

$$U = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} (400 \text{ N/m}) (0,0)^2 = 0 \text{ J}$$

### **b. Energi Potensial Gravitasi**

Contoh lain tentang energi potensial adalah energi potensial gravitasi. Kita akan membahasnya pada contoh berikut ini.

Kita ambil sebuah permasalahan buah apel yang jatuh dari pohonnya dengan ketinggian  $h$  meter. Bagaimana perubahan energi potensialnya dan perubahan energi kinetiknya? Berapa energi kinetik apel saat sampai di permukaan tanah?

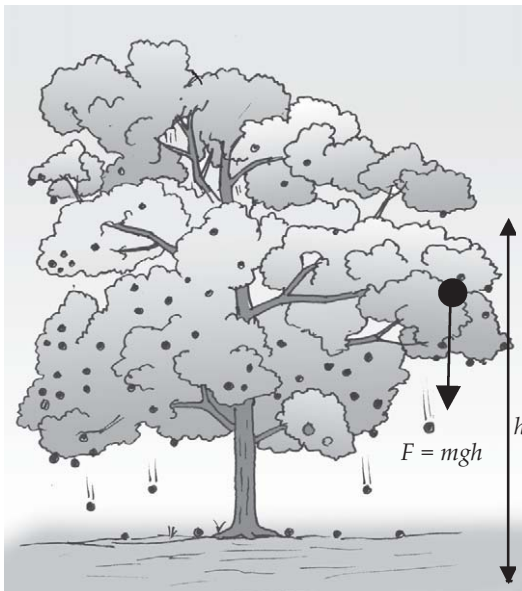
Pada contoh ini sistem adalah antara apel dan bumi, gaya yang bekerja dalam sistem adalah gaya gravitasi bumi. Energi kinetik mula-mula adalah 0 karena apel masih tergantung di pohon. Apel mencapai permukaan tanah dengan kecepatan sebut saja  $v$ , maka energi kinetiknya saat di tanah adalah  $K$ , dan perubahan energi kinetiknya positif atau bertambah. Energi potensial berubah sesuai dengan perubahan energi kinetiknya. Apabila perubahan energi kinetiknya membesar maka perubahan energi potensialnya mengecil. Dengan demikian energi potensial saat apel masih di pohon lebih besar dari energi potensial apel ketika sudah sampai di tanah.

Apabila percepatan gravitasi tidak berubah besarnya untuk ketinggian yang kecil, maka gaya gravitasi yang dikerjakan bumi kepada apel sebesar  $F = -mg$ . Arah gaya ke bawah atau menuju permukaan tanah.

Usaha yang dikerjakan bumi pada apel adalah:

$$W = Fs$$

$$W = mgh$$



Kerja bernilai positif karena arah gaya sama dengan arah pergeseran yaitu ke bawah.

Apel jatuh dari pohon dengan ketinggian  $h$ . Usaha yang dilakukan gaya gravitasi positif karena arah gaya sama dengan arah pergeseran apel yaitu ke bawah.

Perubahan tenaga potensial apel  $\Delta U = U_p - U_h$ . Tenaga potensial di permukaan tanah bisa dianggap 0,

$$\Delta U = -W$$

$$U_o - U_h = -W = -mgh$$

$U_p$  = energi potensial di permukaan tanah

maka tenaga potensial saat apel berjarak  $h$  adalah:

$$U = mgh \quad \dots \quad (13)$$

Dari kasus ini kita bisa mendapatkan tenaga potensial sebuah benda yang berada pada permukaan bumi berbanding lurus dengan massa dan ketinggiannya.

Perubahan tenaga kinetiknya  $\Delta K = -\Delta U = mgh$ , sehingga

$$K_p - K = mgh$$

$K_p$  adalah energi kinetik di permukaan tanah.

Karena energi kinetik mula-mula adalah nol maka energi kinetik saat sampai di permukaan tanah adalah:

$$K = mgh$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$$v^2 = 2gh$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

### 3. Energi Mekanik

Kita sudah membahas bahwa perubahan energi potensial pada suatu sistem sama dengan perubahan energi kinetik sistem itu tapi berlawanan tanda, sehingga jumlah kedua perubahan tersebut adalah 0. Dengan kata lain, jumlah energi potensial dan energi kinetik sistem adalah konstan. Kita dapat menuliskannya sebagai:

$$\Delta K + \Delta U = 0$$

$$K + U = \text{konstan}$$

atau

$$\frac{1}{2}mv^2 + U_{(x)} = \frac{1}{2}mv_o^2 + U_{(0)} \quad \dots \quad (14)$$

Mari kita tinjau ruas kanan, nilai  $v_o$  dan  $U(0)$  hanya bergantung pada keadaan awal, jadi selama terjadi gerakan

besarnya konstan. Dengan demikian besarnya jumlah energi kinetik dan energi potensial di ruas kiri juga konstan selama terjadi gerakan. Persamaan (14) disebut sebagai *hukum kekekalan energi mekanik*. Energi mekanis adalah hasil penjumlahan antara energi potensial dengan energi kinetik.

$$\text{Energi Mekanik} = K + U$$

Hukum kekekalan energi mekanik untuk sistem pegas-massa adalah:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 = E \quad \dots \quad (15)$$

Sedang hukum kekekalan energi mekanik untuk sistem gravitasi bumi adalah:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = E \quad \dots \quad (16)$$

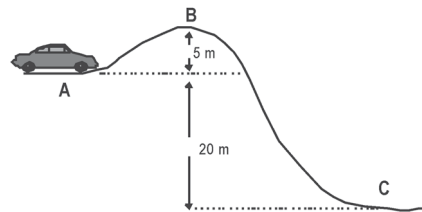


### Life Skills : Kecakapan Akademik

Kerjakan soal berikut!

Mobil bergerak menempuh jarak seperti gambar di samping ini!

Bila massa mobil adalah 2 ton, tentukan energi potensial mobil tersebut berada di titik B dan C (gunakan titik A sebagai acuan ( $h_A = 0$ ))



## C. Energi Potensial Sistem Planet

Kita sudah mempelajari energi potensial dan energi kinetik sistem massa pegas dan benda gravitasi bumi. Sekarang kita akan mempelajari sistem planet. Mari kita tinjau sistem matahari dan planetnya. Massa matahari adalah  $M$  dan massa planet adalah  $m$ . Bila mula-mula jarak antara

matahari dan planet  $r_1$  kemudian berubah menjadi berjarak  $r_2$ , harus ada energi agar jarak antara matahari dan planet berubah. Tenaga itu kita namakan energi potensial gravitasi. Kalian masih ingat bukan energi potensial adalah energi yang berkaitan dengan posisi atau konfigurasi sistem. Sesuai persamaan (12), perubahan energi potensial gravitasi antara matahari dan planetnya untuk merubah posisi planet dari  $r_1$  menjadi  $r_2$  sama dengan minus usaha yang dilakukan gaya gravitasi agar posisinya berubah dari  $r_1$  menjadi  $r_2$ . Usaha yang dilakukan adalah agar berpindah sejauh  $dr$  adalah  $dU$ . Jadi, usaha yang dilakukan gaya gravitasi adalah:

$$dU = -dW = -Fdr$$

atau

$$U_{(r_2)} - U_{(r_1)} = - \int_{r_1}^{r_2} \frac{GMm}{r^2} dr = - \left( \frac{GMm}{r_2} - \frac{GMm}{r_1} \right) \dots (17)$$

Gaya gravitasi  $F$  searah dengan perpindahan maka  $dW = -Fdr$ . Bila  $U$  sama dengan nol di titik tak terhingga dan jarak  $r_2$  adalah jarak pisah di titik  $r$  dan  $r_1$  di tak hingga maka persamaan (17) menjadi

$$\Delta U = U(r) - U(\infty) = 0 - \frac{GMm}{r}$$

Energi potensial gravitasinya adalah:

$$U_{(r)} = -\frac{GMm}{r} \dots (18)$$

Ketika kita mempelajari tentang gaya gravitasi kita dapatkan bahwa planet yang mengitari matahari dengan jarak  $r$  memiliki hubungan antara jarak dengan kecepatannya sebagai:

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$



Energi kinetik planet yang mengitari matahari adalah:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\frac{GM}{r} = \frac{1}{2}U(r) \quad \dots (19)$$

Energi mekanik sistem matahari planet adalah:

$$E = U + K = -\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r} \quad \dots (20)$$

Jari-jari bumi adalah sebesar  $R$  meter dan percepatan gravitasi di permukaan bumi adalah  $g \text{ m/det}^2$ . Massa bumi adalah  $M$  dan massa satelit adalah  $m$ . Berapakah kecepatan sebuah satelit agar dapat terbebas dari gravitasi bumi?

Kita dapat mencarinya dengan menggunakan dari persamaan (17)

$$U_{(r_2)} - U_{(r_1)} = \frac{GMm}{r_1} - \frac{GMm}{r_2}$$

Bila  $r_1$  adalah posisi di permukaan bumi dan  $r_2$  posisi setinggi  $h$  di atas permukaan bumi, dan kita mengambil  $U = 0$  di permukaan bumi maka kita akan mendapatkan

$$U(r_2) - 0 = \frac{GMm}{R} - \frac{GMm}{R+h}$$

Semakin jauh satelit dari permukaan bumi maka energi potensialnya semakin besar. Tenaga potensial maksimal yang dimiliki satelit adalah sebesar:

$$U_{maks} = \frac{GMm}{R}$$

Dengan demikian perubahan potensial yang dialami satelit sebesar tenaga potensial maksimal yang dimiliki satelit.

Jika satelit ditembakkan dengan kecepatan awal  $v$  dari permukaan bumi maka semakin lama kecepatannya akan berkurang. Perubahan energi kinetik terbesar yang dapat dicapai adalah sebesar perubahan tenaga potensial terbesar. Sehingga besarnya perubahan tenaga kinetik terbesar sama dengan tenaga potensial maksimal. Jika tenaga kinetik awal

satelit lebih besar dari energi potensial maksimal maka satelit masih memiliki sisa tenaga kinetik untuk bergerak di jarak yang sangat jauh. Jadi satelit akan terlepas dari bumi jika tenaga kinetik awal lebih besar dari energi potensial maksimal. Besarnya energi kinetik maksimal tersebut adalah:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$

Kecepatan minimal yang diperlukan untuk lepas dari bumi adalah:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2GMR}{R^2}} = \sqrt{2gR}$$

Perhatikanlah bahwa pemilihan letak  $U$  bernilai nol akan memengaruhi fungsi potensial  $U$ . Kalian memiliki kebebasan menentukan nilai  $U$  di suatu titik tertentu yang memungkinkan. Sebagai contoh pengambilan nilai  $U = 0$  bisa di permukaan bumi atau di tak hingga, dan fungsi  $U$  yang dihasilkan juga berbeda. Kedua fungsi tersebut sama benarnya. Kita bisa memilih salah satu dari keduanya sesuai dengan permasalahan yang kita hadapi. Yang harus kalian ingat adalah perubahan energi kinetik sama dengan minus perubahan energi potensial, jadi yang penting adalah perubahan beda potensialnya.



### Wawasan Produktivitas : Daya Saing

Sekarang banyak teknologi canggih bermunculan dari negara-negara maju. Nah, setelah kalian mempelajari energi potensial sistem planet, apa yang kalian pikirkan untuk mengejar ketinggalan teknologi kita? Berkonsultasilah kepada guru kalian!

## D. Sistem Konservatif

Apakah tenaga mekanis selalu kekal? Jawabannya **tidak**. Jika demikian kapan hukum kekekalan tenaga mekanis berlaku? Hukum kekekalan tenaga mekanis berlaku jika sistemnya adalah sistem yang konservatif. Contoh sistem konservatif adalah sistem pegas dan massa dengan gaya yang bekerja hanya gaya pegas, contoh lain bumi dan benda di permukaannya yang hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi.

Mari kita tinjau sistem pegas dan massa. Sebuah pegas di ujungnya diberi benda bermassa  $m$ , dan ditarik sejauh  $x$  dari titik kesetimbangannya. Bila massa berada di atas permukaan yang licin maka massa akan bergerak bolak-balik di sekitar titik keseimbangan, gaya yang bekerja hanya gaya pegas. Massa bergerak menandakan memiliki tenaga kinetik atau memiliki kemampuan untuk melakukan usaha karena adanya gerak. Selama gerakan bolak-balik kemampuan melakukan usaha tetap sama selama gerakan. Bukankah setelah massa kita lepas massa akan menekan pegas sampai simpangan maksimum lalu kembali ke tempat semula? Gaya yang demikian disebut gaya konservatif.

Bagaimana jika permukaan tempat massa tidak licin, atau memiliki gesekan? Jika permukaan tidak licin bidang permukaan memberikan gaya gesek pada massa yang arahnya selalu berlawanan dengan arah gerak. Sebagai akibatnya tenaga kinetiknya akan berkurang ketika kembali ke titik semula. Kita katakan kemampuan melakukan usaha tidak kekal, dan hal ini akan terjadi jika paling tidak ada satu gaya yang tidak konservatif. Gaya yang bekerja pada sistem ini adalah gaya pegas dan gaya gesek. Gaya pegas yang telah kita bahas merupakan gaya yang konservatif jadi gaya gesek merupakan gaya nonkonservatif. Sistem yang demikian disebut sistem yang nonkonservatif.

Secara umum kita bisa mengatakan suatu gaya bersifat konservatif jika usaha yang dilakukan oleh gaya itu pada suatu partikel yang bergerak menempuh sembarang lintasan sampai ke kembali ke titik semula sama dengan nol.



### Contoh Soal 9

Sebuah pegas ujungnya diberi balok bermassa  $m$ , diletakkan pada permukaan licin. Pegas kemudian ditarik sehingga benda bergeser ke posisi  $x$ . Pegas kemudian dilepaskan. Berapakah usaha yang dilakukan pegas saat:

- pegas bergerak dari  $x$  sampai  $x = 0$
- pegas bergerak dari  $x = 0$  sampai  $-x$
- pegas bergerak dari  $-x$  sampai  $x = 0$
- pegas bergerak dari  $0$  sampai  $x$
- berapa total usaha yang dilakukan pegas dari posisi massa di  $x$  sampai kembali lagi ke posisi semula? Apakah sistem tersebut sistem yang konservatif

**Penyelesaian :**

- Saat massa bergerak dari titik terjauh sampai ke titik setimbang usaha yang dilakukan pegas adalah  $\frac{1}{2} kx^2$ .
- Usaha yang dilakukan pegas dari titik kesetimbangan sampai massa menekan pegas maksimum adalah  $-\frac{1}{2} kx^2$ , tanda minus karena arah gaya berlawanan dengan arah pergeseran.
- Usaha yang dilakukan pegas dari titik pegas tertekan maksimum sampai titik kesetimbangan adalah  $\frac{1}{2} kx^2$ .
- Usaha yang dilakukan pegas dari titik kesetimbangan sampai titik semula adalah  $-\frac{1}{2} kx^2$ .
- Jadi selama gerakan dari diregangkan sejauh  $x$  sampai kembali ke titik itu lagi usaha total pegas adalah nol. Dengan demikian kita bisa mengatakan sistem pegas - massa tersebut adalah sistem konservatif.

### Soal Latihan:

Ada pepatah sepandai tupai melompat akhirnya jatuh juga. Tahukah Anda apa artinya? Seandainya ada sebuah tupai gagal melompat dari pohon kelapa yang ketinggiannya 4 m, sedangkan massa tupai 1,5 kg. Berapakah kecepatan tupai saat sampai di permukaan tanah?



## Contoh Soal 10

Seorang anak bermain luncuran dari suatu timbunan tanah setinggi  $h$  ke timbunan yang lain setinggi  $h$ . Berapa usaha yang dilakukan gravitasi bumi pada anak itu saat anak berada di puncak timbunan sampai di dasar timbunan? Berapa usaha yang dilakukan gravitasi bumi pada anak itu dari anak di bawah timbunan sampai di puncak timbunan yang lain? Berapa kecepatan anak di bawah timbunan? Timbunan licin sehingga anak bisa meluncur tanpa gesekan. Bila timbunan tidak licin, tetapi memiliki koefisien kinetik sebesar 0,2 apakah sistem tersebut konservatif? Berapa tinggi maksimal yang dicapai anak tersebut? Apakah tenaga mekanik sistem kekal?

### Penyelesaian :

- a. Usaha yang dilakukan gravitasi dari puncak timbunan sampai dasar adalah:

$$W = (-F)(-h) = mgh$$

$W$  positif karena arah gaya sama dengan arah pergeseran.

- b. Usaha yang dilakukan gaya gravitasi dari bawah sampai ke puncak timbunan berikutnya :

$$W = (-F)(h) = -mgh$$

Bertanda negatif karena arah gaya berlawanan dengan arah pergeseran anak.

- a. Kecepatan anak saat di bawah dapat dicari dari konsep perubahan tenaga potensial. Saat anak meluncur turun maka perubahan tenaga potensialnya  $\Delta U = -W = -mgh$ . Perubahan tenaga kinetiknya  $\Delta K = mgh$  karena kecepatan mula-mula adalah 0, maka kecepatan akhir ketika sampai di dasar adalah:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

Kita juga bisa mencari dengan menggunakan hukum kekekalan tenaga mekanik di atas:

$$\frac{1}{2}m(0)^2 + mgh_{11} = \frac{1}{2}mv_2^2 + mg(0)$$

$$v_2 = \sqrt{2gh}$$

Kecepatan tersebut adalah jika timbunan licin tanpa gesekan. Bila ada gesekan, kita tidak bisa menggunakan hukum kekekalan tenaga mekanik. Jika ada gesekan maka gaya yang bekerja adalah gaya gravitasi dikurangi gaya gesekan. Besar gaya gesekan tergantung pada kemiringan. Akan tetapi gaya gravitasi tidak tergantung pada kemiringan, usaha yang dilakukan gaya gravitasi yang membuat anak turun ke bawah tidak tergantung lintasannya, tetapi hanya tergantung pada ketinggiannya.



### Contoh Soal 11



Sumber : Penerbit

Gambar. Seorang anak menuruni papan luncur

Seorang anak bermassa 30 kg meluncur menuruni papan luncur yang miring dengan sudut  $30^\circ$ . Koefisien gesek kinetis antara anak dan papan luncur adalah 0,2. Jika anak mula-mula diam di puncak tempat peluncur pada ketinggian 4 m dari permukaan tanah, berapa kelajuannya saat mencapai dasar?

#### Penyelesaian :

Gaya yang bekerja pada anak adalah gaya gravitasi dan gaya gesek. Besarnya gaya gesek adalah:

$$f_k = \mu_k (mg) (\cos 30^\circ) = 0,2(30)(10)(0,866) = 50 \text{ N}$$

Ketinggian anak 4 meter dan sudut kemiringan  $30^\circ$  maka jarak yang ditempuh anak atau panjang papan luncur adalah  $s = h/\sin 30^\circ = 8 \text{ m}$

Usaha karena gaya gesek adalah:

$$W = f_k s = (50)(8) = 400 \text{ J}$$

Usaha karena gaya gravitasi adalah:

$$W = mgh = (30)(10)(4) = 1200 \text{ J}$$

Jadi, usaha total adalah  $W_{\text{total}} = 1200 \text{ J} - 400 \text{ J} = 800 \text{ J}$

Usaha dari gaya gesek bernilai negatif karena gaya dan arah pergeserannya berlawanan.

Anak mula-mula diam di atas papan luncur maka perubahan tenaga kinetik sama dengan tenaga kinetik akhirnya sehingga

$$K = W_{total}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = K$$

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2(768 \text{ J})}{(30 \text{ kg})}}$$



### Life Skills : Kecakapan Sosial

Kalian sudah belajar mengenai sistem konservatif dalam hukum kekekalan. Terapkan dalam kehidupan sehari-hari dalam rangka memecahkan problem energi di masyarakat. Berkonsultasilah kepada guru kalian!

## 1. Hukum Kekekalan Energi Umum

Bagaimana hukum kekekalan energi jika sistem tidak konservatif? Jika sistemnya konservatif kita tahu bahwa energi mekanis sistem adalah kekal. Jika sistem tidak konservatif maka energi mekanis sistem tidak kekal tetapi total energinya kekal. Energi yang ada pada sistem yang nonkonservatif disumbang oleh energi kinetik, energi potensial, dan juga energi yang lain. Pada contoh pegas dan massa pada permukaan yang tidak licin maka energinya adalah energi kinetik dari gerakan, energi potensial dari konfigurasi pegas, dan energi karena gesekan. Kehilangan energi mekanis berubah menjadi tenaga untuk mengatasi gesekan. Jadi energi tidak hilang hanya berubah bentuk. Hukum kekekalan energi umum berbunyi energi tidak dapat dimusnahkan dan tidak dapat diciptakan tetapi dapat berubah bentuk.



Secara umum teorema kekekalan energi umum dapat dituliskan sebagai  $W_{nk} = \Delta E$ .

Dengan  $W_{nk}$  adalah energi nonkonservatif dan  $\Delta E$  adalah perubahan energi mekanik. Pada contoh (11)  $W_{nk}$  disebabkan oleh gaya gesek. Jadi energi mekanik anak ketika di puncak papan luncur berbeda dengan energi mekanik anak ketika sampai di bawah papan luncur.

## 2. Daya

Daya adalah laju perubahan usaha dari satu sistem ke sistem yang lain. Perhatikan gaya  $F$  bekerja pada sebuah partikel sehingga partikel bergerak dengan kecepatan sesaat  $v$ , selama selang waktu  $dt$  partikel bergeser sejauh  $ds$ . Besar pergeseran adalah  $ds = vdt$ . Usaha yang dikerjakan gaya  $F$  pada partikel adalah:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = Fvdt \quad \dots \quad (19)$$

Laju usaha atau kecepatan perubahan usaha adalah:

$$P = dW/dt = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad \dots \quad (20)$$

Satuan daya adalah J/detik sering dinamakan satu Watt.

$$1 \text{ J/s} = 1 \text{ Watt}$$

Kita tidak bisa menyamakan daya dengan usaha atau energi. Daya menunjukkan kemampuan suatu alat merubah energi. Bila kalian memiliki lampu 5 Watt, artinya lampu mengubah 5 Joule tenaga listrik tiap detiknya menjadi tenaga panas dan cahaya. Satuan energi sering menggunakan satuan daya seperti watt-jam.

$$1 \text{ Watt-jam} = 1\text{W} \cdot 3600 \text{ detik} = 3600 \text{ Joule.}$$

Satuan daya yang sering digunakan adalah 1 daya kuda atau horsepower.

$$1 \text{ hp} = 550\text{ft lb/s} = 746 \text{ W}$$



## Ringkasan

### 1. Usaha atau kerja

Usaha atau kerja didefinisikan sebagai  $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$

besar usaha adalah  $W = Fs \cos \theta$

Usaha akan ada jika ada perpindahan  $s$ , ada gaya dan sudut antara gaya dan perpindahan tidak tegak lurus.

### 2. Energi

Energi adalah kemampuan melakukan usaha. Energi kinetik adalah energi karena gerakannya

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Teorema usaha energi menyatakan: Usaha total yang dilakukan pada sebuah partikel sama dengan perubahan energi kinetik partikel. Besarnya perubahan energi kinetik sama dengan usaha  $\Delta K = W$

Tenaga potensial untuk sistem

pegas-massa adalah  $U = \frac{1}{2}kx^2$

dengan  $U$  bernilai nol di  $x=0$

Energi potensial untuk sistem benda-gravitasi di permukaan bumi

$$U = mgh$$

dengan  $U$  bernilai 0 di permukaan bumi

Energi potensial untuk sistem matahari-planet

$$U(r) = -\frac{GMm}{r}$$

dengan  $U$  bernilai 0 di tak terhingga.

Energi mekanik adalah jumlah antara energi kinetik dan energi potensial

$$E = K + U$$

### 3. Usaha dan energi pada sistem konservatif

Perubahan energi potensial suatu sistem merupakan negatif usaha yang dilakukan sistem konservatif.

$$\Delta U = -W$$

$W$  adalah usaha yang dilakukan sistem.

Dalam suatu sistem yang konservatif besarnya perubahan energi potensial sama dengan perubahan energi kinetik tetapi tandanya berlawanan.

$$\Delta U = \Delta K$$

artinya jika energi potensial membesar maka energi kinetiknya mengecil dan sebaliknya.

Energi mekanik adalah jumlah antara energi kinetik dan energi potensial.

### 4. Hukum kekekalan energi mekanik dalam sistem yang konservatif energi mekanik sistem adalah konstan

$$E = K + U = \text{konstan}$$



## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

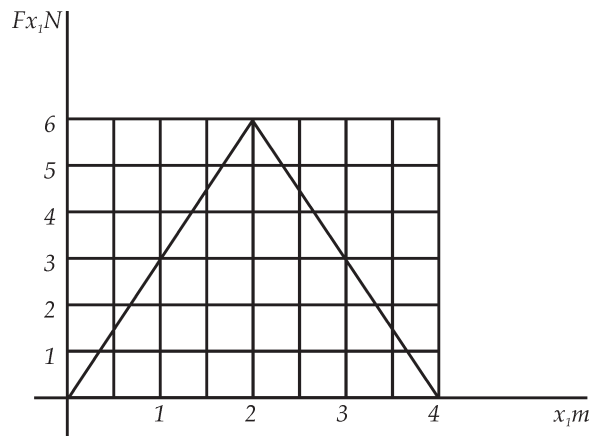
1. Besarnya usaha untuk menggerakkan mobil (massa mobil dan isinya adalah 1.000 kg) dari keadaan diam hingga mencapai kecepatan 72 km/jam adalah (gesekan diabaikan) ....  
A.  $1,25 \times 10^4$  J  
B.  $2,5 \times 10^4$  J  
C.  $2,00 \times 10^5$  J  
D.  $6,25 \times 10^5$  J  
E.  $4,00 \times 10^6$  J
2. Air terjun setinggi 20 m digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Setiap detik air mengalir  $10 \text{ m}^3$ . Jika efisiensi generator 55% dan percepatan gravitasi  $g = 10 \text{ m/s}^2$  maka daya rata-rata yang dihasilkan (dalam kWh) ....  
A. 110  
B. 1.100  
C. 2.200  
D. 2.500  
E. 5.500
3. Di bawah ini adalah satuan energi, **kecuali** ....  
A. Joule  
B. erg  
C. kwh  
D. Nm  
E. Watt

4. Bila sebuah benda dijatuhkan tanpa kecepatan awal dan gesekan udara diabaikan, maka ....
- A. energi kinetiknya bertambah
  - B. energi kinetiknya berkurang
  - C. energi potensialnya bertambah
  - D. energi mekaniknya berkurang
  - E. energi mekaniknya bertambah
5. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian  $h$  dan pada suatu saat energi kinetiknya tiga kali energi potensialnya. Pada saat itu tinggi benda adalah ....
- A.  $\frac{1}{4} h$
  - B.  $\frac{1}{3} h$
  - C.  $\frac{1}{2} h$
  - D.  $2 h$
  - E.  $3 h$
6. Sebuah benda massanya 10 kg bergerak dengan kecepatan 4 m/det pada bidang datar. Karena pengaruh gaya, kecepatannya berubah menjadi 9 m/det. Besar usaha selama benda bergerak adalah ....
- A. 25 J
  - B. 80 J
  - C. 325 J
  - D. 405 J
  - E. 485 J
7. Benda yang massanya 0,5 kg dilemparkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal 20 m/det. Jika  $g = 10 \text{ m/det}^2$ . Energi kinetik benda saat mencapai  $\frac{1}{4}$  tinggi maksimal adalah ....
- A. 25 J
  - B. 40 J
  - C. 50 J
  - D. 75 J
  - E. 100 J

8. Pada suatu keadaan kecepatan sebuah benda menjadi setengah kali kecepatan semula. Maka tenaga kinetiknya menjadi ....
- A.  $\frac{1}{4}$  kali
  - B.  $\frac{1}{2}$  kali
  - C. 2 kali
  - D. 4 kali
  - E. 8 kali
9. Sebuah benda bermassa 2 kg terletak di tanah. Benda ditarik vertikal ke atas dengan gaya 25 N selama 2 detik, kemudian dilepaskan. Jika  $g = 10 \text{ m/det}$ , energi kinetik benda pada saat menyentuh tanah adalah ....
- A. 25 J
  - B. 50 J
  - C. 100 J
  - D. 125 J
  - E. 150 J
10. Simpangan getaran harmonis dari sebuah pegas dengan amplitudo  $\sqrt{2} \text{ cm}$  sewaktu mempunyai energi kinetik dua kali energi potensial adalah ....
- A.  $\frac{\sqrt{6}}{3} \text{ cm}$
  - B.  $\sqrt{2} \text{ cm}$
  - C. 1 cm
  - D.  $\frac{\sqrt{6}}{2} \text{ cm}$
  - E.  $\sqrt{6} \text{ cm}$

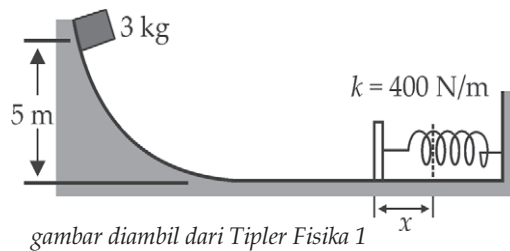
**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

1. Sebuah peluru bermassa 10 gram memiliki kelajuan 1,5 km/det.
  - a. Berapakah energi kinetiknya?
  - b. Berapa energi kinetiknya jika kelajuannya dijadikan setengahnya?
  - c. Berapa energi kinetiknya jika kelajuannya dijadikan dua kalinya?
2. Carilah energi kinetik (dalam Joule) untuk :
  - a. Bola bermassa 0,150 kg yang bergerak dengan kelajuan 40 m/det.
  - b. Seorang pelari bermassa 55 kg yang berlari dengan kelajuan konstan 2 detik tiap 3 meter.
3. Sebuah partikel bermassa 2 kg bergerak dengan kelajuan 3 m/det saat berada di  $x = 0$ . Partikel dipengaruhi gaya  $F_x$  seperti yang ditunjukkan pada gambar.



- a. Berapakah energi kinetik partikel saat di  $x = 0$ ?
- b. Berapa kerja yang dilakukan oleh gaya jika partikel dari  $x = 0$  ke  $x = 4$ ?
- c. Berapakah kelajuan partikel saat di  $x = 4$  m?

4. Seorang anak mengikatkan sebuah balok bermassa 2 kg pada pegas yang diletakkan horisontal. Konstanta gaya pegas 300 N/m. Anak itu kemudian menekannya hingga pegas tertekan sepanjang 9 cm.
  - a. Carilah usaha yang dilakukan oleh anak itu!
  - b. Carilah usaha yang dilakukan oleh pegas!
  - c. Balok dilepaskan dan meninggalkan pegas saat pegas berada di titik setimbang.
  - d. Carilah kelajuan balok saat meninggalkan pegas!
5. Sebuah benda bermassa 3 kg dilepaskan dari keadaan diam pada ketinggian 5 m pada jalan landai licin yang melengkung. Di kaki jalan landai itu terdapat sebuah pegas dengan konstanta gaya 400 N/m. Benda bergerak turun pada jalan landai ini menuju pegas, dan menekannya sejauh  $x$  sebelum diam sesaat.
  - a. Carilah  $x$ !
  - b. Apa yang terjadi dengan benda setelah berhenti?



6. Sebuah benda bergerak sepanjang lintasan licin. Mula-mula benda berada di titik P, lalu menurun dengan kelajuan awal 7 m/detik.
  - a. Berapa kelajuan saat di dasar?
  - b. Di mana balok berhenti?
  - c. Berapa kelajuan minimal yang diperlukan agar benda dapat mencapai titik Q?

7. Balok bermassa 3 kg mula-mula diam lalu meluncur menuruni lengkungan yang licin dengan ketinggian 3 m. Balok kemudian bergerak 9 meter pada permukaan yang kasar sebelum berhenti.
  - a. Berapakah kelajuan balok di dasar jalan landai?
  - b. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gesekan?
  - c. Berapakah koefisien gesekan antara balok dan permukaan horizontal?
8. Tubuh kita mengubah energi kimia internal menjadi usaha dan panas dengan laju sekitar 100 W, yang dinamakan laju metabolistik.
  - a. Berapa banyak energi kimia internal yang kita pakai selama 24 jam?
  - b. Energi berasal dari makanan yang kita makan, biasanya diukur dalam kilo kalori, dengan 1 kkal = 4,184 kJ. Berapa kilokalori energi makanan yang harus kita makan tiap hari jika laju metabolistik kita adalah 100 W?
9. Air mengalir di suatu air terjun yang tingginya 100 m, dengan laju massa rata-rata  $1,4 \times 10^6 \text{ kg/det}$ . Jika semua energi potensial air diubah menjadi energi listrik, berapakah daya yang dapat dihasilkan air terjun ini?
10. Air terjun setinggi 10 m dengan debit  $50 \text{ m}^3/\text{det}$  dimanfaatkan untuk memutar turbin yang menggerakkan generator listrik. Jika 25% energi air dapat berubah menjadi energi listrik dan  $g = 10 \text{ m/det}^2$ , berapakah daya keluarannya?





## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. usaha,
2. energi atau tenaga,
3. energi potensial sistem planet, dan
4. sistem konservatif.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab V

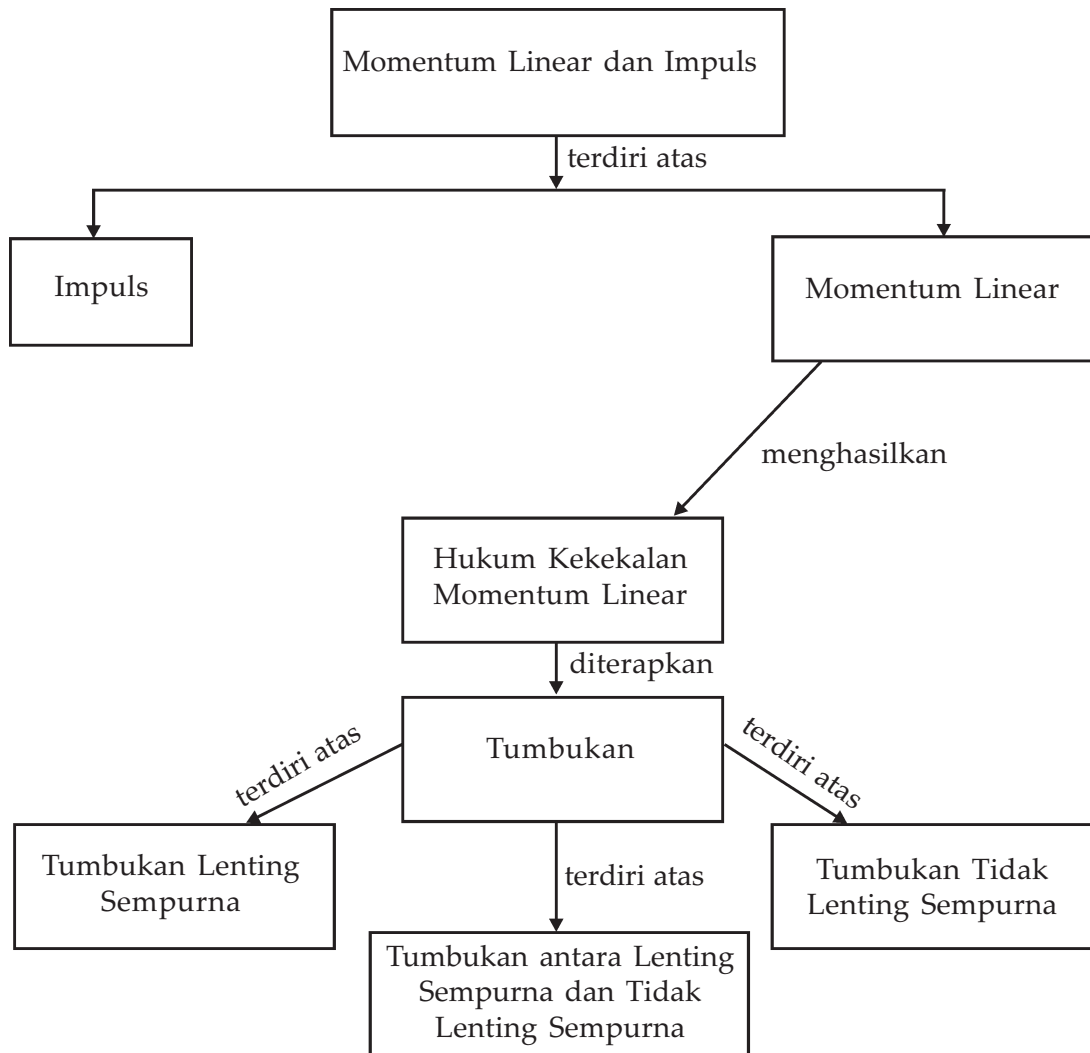
# Momentum Linear dan Impuls



Sumber : [www.police.com](http://www.police.com).

*Benda yang bergerak pada kelajuan konstan merupakan hasil kali massa dan kecepatan dinamakan momentum. Dua buah mobil yang bertabrakan merupakan bagian dalam momentum dan impuls. Dengan konsep momentum dan impuls, perilaku benda dapat dianalisa.*

# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, siswa diharapkan mampu :

1. menyelesaikan masalah-masalah yang berhubungan dengan momentum linear serta tumbukan, dan
2. menganalisis hal-hal dalam kehidupan dengan hukum-hukum tentang momentum dan tumbukan.



## Motivasi Belajar

Pernahkah kalian melihat dua buah mobil yang bertabrakan? Bagaimana keadaan kedua mobil setelah tabrakan? Yang mungkin terjadi adalah salah satu mobil akan berubah arah, kedua mobil akan berubah arah, atau mungkin mobil akan bergerak bersama. Kapan ketiga kemungkinan itu bisa terjadi? Untuk mengetahuinya pelajasilah materi bab ini dengan saksama.

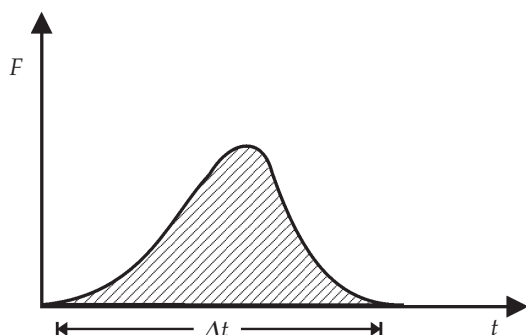


## Kata-kata Kunci

impuls, gaya, momentum, perubahan momentum, tumbukan, koefisien restitusi

### A. Impuls

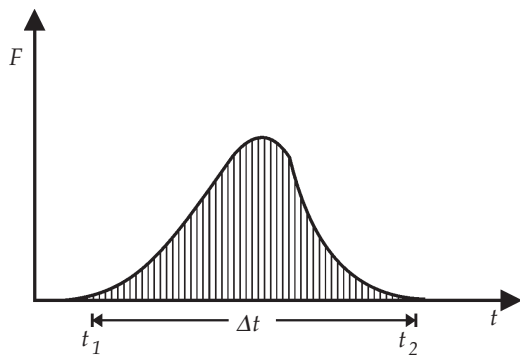
Apa yang kalian pikirkan jika mendengar kata impuls? Impuls berkaitan dengan gaya. Mengapa benda diam bisa menjadi bergerak, mengapa benda bergerak bisa berubah kecepatannya? Semua itu disebabkan oleh gaya. Jika sebuah bola yang dipukul hingga berubah kecepatannya. Gaya yang dilakukan pemukul pada bola merupakan gaya kontak yang bekerja sangat singkat dan menyebabkan perubahan kecepatan dan arahnya. Jika kita gambarkan gaya yang bekerja selama selang waktu  $\Delta t$  seperti pada Gambar (5.1) maka impuls adalah luasan di bawah kurva  $F$  terhadap  $t$ .



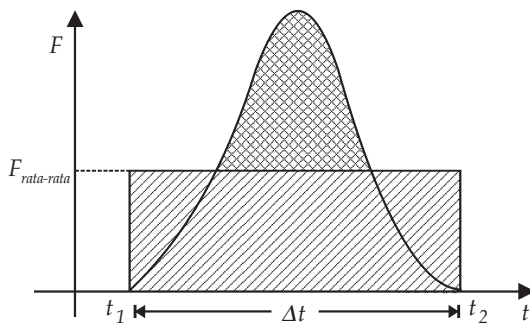
**Gambar 5.1** Gaya berubah sebagai fungsi waktu. Gaya sangat besar dalam selang waktu yang sangat singkat. Besar impuls adalah luasan di bawah kurva.

Impuls merupakan total gaya yang bekerja selama selang waktu tertentu.

Kita bisa mencari luasan di bawah kurva dengan membagi luasan tadi menjadi persegi panjang-persegi panjang yang kecil misalkan berjumlah  $n$  persegi panjang dan kemudian menjumlahkan semua persegi panjang tersebut. (gambar 5.2). Lebar persegi panjang adalah  $dt$  dengan  $dt = \frac{\Delta t}{n}$ , tinggi persegi panjang adalah nilai fungsi pada tiap  $dt$ . Impuls diberi batas  $I$ , yang berarti



**Gambar 5.2** Luasan di bawah kurva  $F$  kita bagi menjadi  $n$  persegi panjang. Luas-luasan di bawah kurva adalah jumlah seluruh luas persegi panjang. Luas tiap persegi panjang adalah  $F(t).dt$



**Gambar 5.3** Luas kotak yang diarsir adalah impuls karena gaya rata-rata. Luasnya sama dengan luas kurva yang menunjukkan impuls karena kurva gaya.

$$I = \sum_n F(t) dt \quad \dots (1)$$

Gaya yang bekerja umumnya sangat singkat, kita bisa mendekati gayanya dengan gaya rata-rata yang konstan yang bekerja selama selang waktu  $\Delta t$ , seperti yang ditunjukkan Gambar (5.3). Gaya rata-rata tadi menghasilkan impuls yang sama seperti gaya yang sesungguhnya pada selang waktu tersebut.

Sekarang kita bisa menyatakan luasan dibawah kurva  $F$  dengan gaya-rata-rata sebagai:

$$I = \vec{F}_{\text{rata-rata}} \Delta t = \vec{F}_{\text{rata-rata}} (t_2 - t_1) \quad \dots (2)$$

Masih ingatkah kalian, gaya merupakan besaran vektor? Gaya merupakan besaran vektor, sedangkan waktu adalah besaran skalar. Impuls dengan demikian juga besaran vektor dengan arah sama dengan arah gaya yang menyebabkan impuls.

## B. Momentum Linear

Mari kita tinjau lagi bola yang sedang bergerak kemudian dipukul oleh pemukul, apa yang terjadi? Bola akan berbalik arah atau terjadi perubahan kecepatan. Perubahan terjadi karena gaya pada pemukul atau karena adanya impuls. Bila impuls kita sebut  $I$ , kecepatan bola mula-mula adalah  $v_o$  dan kecepatan bola setelah dipukul adalah  $v_t$ . Kita bisa menuliskan persamaan yang menghubungkan impuls dan perubahan kecepatan sebagai:

$$I = \int \vec{F} dt = \int m \frac{dv}{dt} \cdot dt = \int_w^u m v dv$$

sehingga:

$$\vec{I} = m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0 \quad \dots \quad (3)$$

Besaran massa dikalikan dengan kecepatan disebut momentum linear, diberi simbol  $p$ . Persamaan di atas bisa kita katakan impuls akan menyebabkan terjadinya perubahan momentum. Impuls adalah besaran vektor dengan satuan N det, momentum memiliki satuan satuan massa dikalikan satuan kecepatan atau kg m/det.  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/det}$ . Kecepatan merupakan besaran vektor dan massa adalah besaran skalar. Momentum merupakan besaran vektor dengan arah sama dengan arah kecepatan.

$$\vec{I} = m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0 \quad \dots \quad (4)$$

Jika kita tinjau pada satu dimensi saja maka tanda vektor dapat kita hilangkan.

Pada persamaan (1) bila  $dt$  sangat kecil mendekati 0 penjumlahan bisa kita gantikan dengan integrasi. Dengan menggabungkan persamaan (1) dan persamaan (3) bisa kita nyatakan hubungan antara gaya dengan perubahan momentum.

$$\vec{I} = \int \vec{F} dt = d\vec{p}$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \dots \quad (5)$$

Pada persamaan (5) merupakan hukum Newton II dalam bentuk momentum.

*Gaya adalah perubahan momentum linear persatuan waktu.*

Lihatlah sebuah bola yang diam, bila tidak ada gaya yang bekerja pada bola maka bola akan tetap diam dan tidak terjadi perubahan momentum. Demikian juga bila bola bergerak dengan kecepatan konstan bila tidak ada gaya yang bekerja bola akan tetap bergerak dengan kecepatan konstan dan tidak terjadi perubahan momentum. Bagaimana jika ada 2 gaya atau lebih yang bekerja pada benda tetapi jumlah total gaya adalah nol? Bila total gaya bernilai nol maka tidak akan terjadi perubahan momentum pada bola.



## Contoh Soal 1

Sebuah tomat bermassa 25 gram jatuh dari keranjangnya pada ketinggian 1 m. Tomat menempuh 1,5 cm (kira-kira setengah diameternya) setelah pertama kali menyentuh permukaan lantai, sebelum akhirnya pecah.

- Carilah impuls yang dikerjakan lantai pada tomat!
- Berapa kira-kira waktu tumbukan tomat?
- Berapa kira-kira gaya rata-rata yang dikerjakan lantai pada tomat?

### Penyelesaian :

Diketahui :  $m = 25 \text{ gram} = 0,025 \text{ kg}$

$h = 1 \text{ m,}$

$\Delta x = 1,5 \text{ cm} = 0,015 \text{ m}$

Jawab :

Impuls menimbulkan perubahan momentum. Kita bisa menghitung impuls dengan menghitung perubahan momentum yang diakibatkannya. Kecepatan tomat saat mencapai lantai dapat dicari dari hubungan :

$$v^2 = 2gh$$

$$v^2 = \sqrt{2(9,8).(1)} = \sqrt{19,6}$$

dengan  $g$  adalah percepatan gravitasi di tempat itu,  $h$  adalah ketinggian tomat mulai jatuh.

Momentum tomat tepat sebelum menyentuh lantai :

$$p = mv = (0,025\text{kg}) (4,4 \text{ m/det}) = 0,11 \text{ kg m/det}$$

Momentum tomat setelah menyentuh lantai:

$$p = mv = (0,025\text{kg}) (0 \text{ m/det}) \text{ karena tomat diam setelah menyentuh lantai.}$$

$$\begin{aligned} \text{Perubahan momentum tomat} &= 0 - 0,11 \text{ kg m/det.} \\ &= -0,11 \text{ kg m/det.} \end{aligned}$$

Impuls yang diberikan lantai 0,11 kg m/det.

- Waktu tumbukan tomat

Kelajuan rata-rata tomat selama tumbukan

$$v = \frac{v_1 + v_0}{2} = 2,2 \text{ m/det.}$$

maka waktu tumbukan :

$$\Delta t = \frac{\Delta y}{v_{\text{rata-rata}}} = \frac{0,015}{2,2} = 0,007 \text{ detik}$$

$$\text{b. Gaya rata-rata} = \frac{I}{\Delta t} = \frac{(0,11)}{(0,007)} = 16 \text{ N}$$



## Contoh Soal 2

Seorang pemain sepak bola menendang bola sehingga bola memiliki kelajuan 25 m/det. Massa bola 0,5 kg.

- Berapa impuls yang diberikan oleh pemain kepada bola?
- Jika kaki pemain menyentuh bola selama 0,006 detik, berapa gaya rata-rata yang diberikan kaki pada bola?

**Penyelesaian :**

Diketahui:  $v_0 = 0$  m/det  
 $v_t = 25$  m/det  
 $\Delta t = 0,006$  detik  
 $m = 0,5$  kg

**Jawab :**

- Perubahan momentum yang terjadi dapat dicari dengan menggunakan persamaan (5.4)

$$\begin{aligned} I &= mv_t - mv_0 \\ &= (0,5 \cdot 25 \text{ kg}) - (0,5 \cdot 0 \text{ m/det}) \\ &= 12,5 \text{ kgm/det} \end{aligned}$$

- Gaya rata-rata yang diberikan pada bola sama dengan impuls yang diberikan pada bola dibagi waktu terjadinya gaya. Dengan menggunakan persamaan (2) kita bisa mencari gaya rata-rata yang diberikan kaki pada bola.

$$\begin{aligned} I &= \vec{F}_{\text{rata-rata}} \Delta t = \vec{F} (t_2 - t_1) \\ \vec{F}_{\text{rata-rata}} &= \frac{I}{\Delta t} = \frac{12,5}{0,006} = 2083 \text{ N} \end{aligned}$$



## Contoh Soal 3

Sebuah bola tenis dilempar mengenai dinding dengan kelajuan 50 m/det sehingga bola membalik dengan besar kelajuan sama dengan kelajuan mula-mula, tetapi arahnya berlawanan. Massa bola 0,2kg.

- Berapa besar impuls yang diberikan pada dinding?
- Bola menyentuh dinding selama 0,002 detik. Berapa gaya rata-rata yang dikerjakan pada dinding oleh bola?



### Penyelesaian :

Bola kita anggap mula-mula bergerak ke arah sumbu x positif, sehingga kecepatannya positif, lalu bola membalik, kecepatan setelah membalik bertanda negatif.

$$\text{Diketahui : } v_0 \text{ bola} = 50 \text{ m/detik}$$

$$v_t \text{ bola} = -50 \text{ m/det}$$

$$m = 0,2 \text{ kg}$$

$$\Delta t = 0,002 \text{ detik}$$

Jawab :

- a. Impuls yang diberikan pada dinding:

$$\begin{aligned} I &= mv_t - mv_0 \\ &= 0,2 (-50 - 50) \\ &= -20 \text{ kg m/det} \end{aligned}$$

Tampak bahwa jika kecepatan awal bola kita beri tanda positif perubahan momentum bernilai negatif, maka impuls yang diberikan bernilai negatif. Perubahan momentum bernilai negatif bisa terjadi pada kasus kecepatan akhir berlawanan arah dengan kecepatan mula-mula atau kecepatan akhir lebih kecil dari kecepatan semula. Impuls yang negatif menunjukkan gaya yang diberikan pada bola berlawanan arah dengan arah kecepatan awal bola.

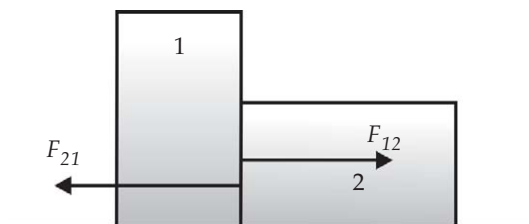
Jika impuls bernilai positif atau searah dengan kecepatan awal benda maka gaya yang diberikan pada benda mempercepat atau menambah kecepatan awal benda.

- b. Gaya rata-rata yang diberikan dinding pada bola :

$$\vec{F}_{\text{rata-rata}} = \frac{I}{\Delta t} = \frac{-20}{0,002} = -10.000 \text{ N}$$

Gaya rata-rata sangat besar dan berlawanan arah dengan kecepatan awal.

## C. Hukum Kekekalan Momentum Linear



Gambar 5.4 Benda saling berinteraksi

Tinjau dua benda yang saling mengerjakan gaya yang sama dan berlawanan dan tidak ada gaya lain yang bekerja pada keduanya. Jika gaya yang dikerjakan oleh partikel 1 pada partikel 2 adalah  $F_{12}$  dan gaya yang dikerjakan oleh partikel 2 pada partikel 1 adalah  $F_{21}$ . Karena kedua gaya sama besar dan berlawanan arah maka resultan keduanya adalah nol.

Jika benda pertama mengalami perubahan mometum sebesar  $\Delta \vec{p}_1$  karena gaya  $\vec{F}_{21}$  dan dan benda kedua mengalami perubahan momentum sebesar  $\Delta \vec{p}_2$  karena gaya  $\vec{F}_{12}$ , maka total gaya pada kedua benda adalah  $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0$  karena kedua benda saling mengerjakan gaya dengan arah yang berlawanan dapat menuliskan sebagai:

$$\vec{F}_{21} + \vec{F}_{12} = \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt}$$

$$0 = \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)}{dt} \quad \dots (6)$$

Persamaan (6) menunjukkan perubahan momentum total persatuan waktu bernilai nol, maka perubahan momentum nol yang berarti momentum total tidak berubah atau konstan.

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{konstan} \quad \dots (7)$$

Persamaan (7) merupakan hukum kekekalan momentum yang menyatakan bahwa jika gaya total yang bekerja pada suatu sistem adalah nol, maka momentum total sistem tersebut adalah kekal. Persamaan (7) dapat dituliskan sebagai :

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2' \quad \dots (8)$$

Jika total gaya sistem adalah 0. Bagaimana jika ada gaya luar? Jika ada gaya luar maka total gaya tidak sama dengan nol, dengan demikian hukum kekekalan momentum tidak berlaku.



#### Contoh Soal 4

Sebuah peluru bermassa 0,01 kg bergerak secara horisontal dengan kelajuan 400 m/det dan menancap pada sebuah balok bermassa 0,4 kg yang mula-mula diam pada sebuah meja yang licin.

- Carilah kecepatan akhir peluru dan balok
- Carilah tenaga mekanik awal dan akhir sistem.

**Penyelesaian :**

$$\begin{aligned}\text{Diketahui : } m_p &= 0,01 \text{ kg} \\ m_b &= 0,4 \text{ kg} \\ v_p &= 400 \text{ m/det} \\ v_b &= 0 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Jawab :

- a. Kecepatan akhir balok dapat kita cari dengan menggunakan Persamaan (8).

$$\begin{aligned}\text{Momentum awal} &= \text{momentum balok mula} + \text{momentum peluru mula} \\ &= (0,01 \text{ kg})(400 \text{ m/det}) + (0,4 \text{ kg})(0) \\ &= 4 \text{ kg m/det}\end{aligned}$$

Momentum akhir = momentum balok akhir + momentum peluru akhir.

Karena peluru menancap pada balok maka kecepatan mereka sama sehingga momentum akhir

$$\begin{aligned}&= (0,01 \text{ kg} + 0,4 \text{ kg})(v' \text{ m/det}) \\ p_1 + p_2 &= p_1' + p_2' \\ 4 &= (0,4) v' \\ v' &= 103 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Kecepatan akhir balok dan peluru adalah 103 m/det, arahnya searah dengan kecepatan peluru mula-mula.

- b. Energi mekanik awal

Energi mekanik dalam hal ini adalah energi kinetik, energi potensial tidak berubah karena benda tidak bergerak naik ataupun turun.

Tenaga kinetik awal :

$$\begin{aligned}K &= K_{\text{peluru}} + K_{\text{balok}} \\ &= \frac{1}{2} (0,01) \text{ kg} \times (400 \text{ m/det})^2 + 0 \\ &= 800 \text{ J}\end{aligned}$$

Tenaga kinetik akhir :

$$\begin{aligned}K &= K_{\text{peluru}} + K_{\text{balok}} \\ &= \frac{1}{2} (0,01 + 0,4) \text{ kg} \times (103 \text{ m/det})^2 + 0 \\ &= 2175 \text{ J}\end{aligned}$$

Tampak bahwa energi kinetiknya menjadi berkurang.



### Contoh Soal 5

Seorang nelayan bermassa 80 kg melompat keluar dari perahu yang bermassa 250 kg yang mula-mula diam. Jika kecepatan nelayan 7,5 m/det ke kanan, berapakah kecepatan perahu setelah nelayan tadi meloncat?

**Penyelesaian :**

$$\begin{aligned}\text{Diketahui} : \quad m_{\text{perahu}} &= 250 \text{ kg} \\ m_{\text{nelayan}} &= 80 \text{ kg} \\ v_{\text{perahu}} &= 0 \\ v_{\text{nelayan}} &= 7,5 \text{ m/det}\end{aligned}$$

**Ditanyakan :**  $v_{\text{perahu}}?$

**Jawab :** hukum kekekalan momentum

$$\begin{aligned}p_1 + p_2 &= p_1' + p_2', \text{ arah ke kanan kita anggap arah (+)} \\ (250)(0) + (80)(0) &= (250)(v') + (80)(7,5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v' &= \frac{-(600)}{250} \\ &= -2,4 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Kecepatan perahu negatif, perahu bergerak berlawanan dengan arah gerak nelayan dengan kelajuan 2,4 m/det perahu bergerak ke kiri.



### Contoh Soal 6

Sebuah peluru bermassa 6 kg ditembakkan dengan sudut  $60^\circ$  terhadap sumbu mendatar, dengan kelajuan awal 40 m/det. Pada saat peluru mencapai ketinggian maksimal peluru meledak menjadi dua dengan massa masing-masing 2 kg dan 4 kg. Pecahan bergerak horisontal tepat setelah terjadi ledakan. Pecahan yang bermassa 2 kg mendarat tepat di tempat peluru diluncurkan (a) Di mana pecahan peluru yang lainnya mendarat? (b) Hitunglah tenaga kinetik peluru tepat sebelum ledakan dan tepat setelah ledakan.

**Penyelesaian :**

$$\begin{aligned}\text{Diketahui} : \quad m_{\text{peluru}} &= 6 \text{ kg} \\ \text{sudut tembakan} &= 60^\circ \\ v_0 &= 40 \text{ m/det} \\ m_1' &= 2 \text{ kg} \\ m_2' &= 4 \text{ kg}\end{aligned}$$

*Jawab :*

Peluru memecah saat mencapai tinggi maksimal. Maka saat pecah kecepatan peluru ke arah sumbu  $x$  atau mendatar dengan kecepatan

$$\begin{aligned}v &= v_0 \cos 60^\circ \\&= 40 \text{ m/s} \cdot (0,5) \\&= 20 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Pecahan peluru pertama kembali ke tempat peluru diluncurkan, maka kecepatan peluru sama dengan kecepatan semula. Tepat setelah ledakan kelajuan peluru = 20 m/det ke arah berlawanan arah semula atau negatif. Peluru kedua bergerak dengan kecepatan  $v_2'$ . Hukum kekekalan momentum berlaku karena total gaya ke arah sumbu  $x$  adalah 0. Tidak ada gaya pada sumbu  $x$ . Dengan menggunakan hukum kekekalan momentum :

$$\begin{aligned}p_1 + p_2 &= p_1' + p_2' \\(6)(20) &= (2)(-20) + (4)(v_2') \\v_2' &= \frac{(120) + (40)}{4} \\&= 40 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Tepat saat pecah pecahan peluru kedua bergerak dengan kecepatan 40 m/det ke kanan.

Tenaga kinetik tepat sebelum ledakan :

$$\begin{aligned}K &= \frac{1}{2} (m) (v_{\text{peluru}})^2 \\&= \frac{1}{2} (6)(20)^2 \\&= 1200 \text{ J}\end{aligned}$$

Tenaga kinetik tepat setelah ledakan :

$$\begin{aligned}K &= K_{\text{peluru 1}} + K_{\text{peluru 2}} \\&= \frac{1}{2} (2)(20) + \frac{1}{2} (4)(40) \\&= 3600 \text{ J}\end{aligned}$$

Setelah meledak tenaga kinetik menjadi 3600 J.

Bagaimana dengan arah ke bawah? Tepat setelah tembakan kecepatan ke arah bawah adalah 0. Pada arah ke bawah terdapat gaya luar yaitu gaya gravitasi, dengan demikian hukum kekekalan momentum tidak berlaku.



## Wawasan Kewirausahaan : Etos Kerja

Bentuklah kelompok belajar yang terdiri atas 4 - 5 siswa (usahakan yang berbeda jenis kelamin untuk belajar berbaur).

Setelah kalian mempelajari hukum kekekalan momentum linear, apakah kalian mempunyai rencana untuk menerapkannya? Jika ya, itu bagus. Coba terapkan dalam kegiatan bisnis yang menguntungkan. Jika menemui kesulitan, berkonsultasilah kepada guru kalian!

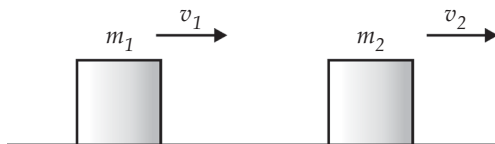
## D. Tumbukan

Tumbukan terjadi bila dua buah benda saling mendekati dan berinteraksi dengan kuat kemudian saling menjauh. Sebelum melakukan tumbukan kedua benda bergerak dengan kecepatan konstan. Setelah tumbukan kedua benda tadi juga bergerak dengan kecepatan konstan tetapi kecepatannya berbeda dengan kecepatan semula. Pada peristiwa tumbukan gaya interaksi sangat kuat dan bekerja sangat cepat, sedangkan gaya luar sangat kecil dibandingkan gaya interaksi sehingga dapat diabaikan. Karena gaya yang ada hanya gaya interaksi saja dan gaya interaksi totalnya adalah nol maka pada tumbukan berlaku hukum kekekalan momentum.

### 1. Tumbukan Lenting Sempurna

Tumbukan lenting sempurna disebut juga tumbukan elastik. Pada tumbukan elastik berlaku hukum kekekalan momentum dan juga hukum kekekalan energi kinetik.

Lihatlah pada peristiwa dua benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$ . Benda bermassa  $m_1$  bergerak dengan dengan kecepatan  $v_1$  ke arah kanan, dan benda kedua bergerak dengan kecepatan  $v_2$  ke arah kanan. (lihat gambar 5.5).



Gambar 5.5 Tumbukan

Mungkinkah terjadi tumbukan? Tumbukan akan terjadi jika  $v_1$  lebih besar dari  $v_2$ . Setelah terjadi tumbukan kecepatan  $m_1$  menjadi  $v_1'$  dan benda kedua menjadi  $v_2'$ . Hukum kekekalan momentum pada peristiwa ini adalah :

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad \dots \quad (9)$$

Hukum kekekalan energi kinetik pada peristiwa ini adalah:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad \dots \quad (10)$$

Benda bermassa  $m_1$  bergerak dengan kecepatan  $v_1$  ke kanan dan benda kedua bermassa  $m_2$  bergerak dengan kecepatan  $v_2$  ke kanan dan  $v_1$  lebih besar dari  $v_2$ . Jika antara kedua benda terjadi tumbukan lenting sempurna, berapa kecepatan relatif kedua benda?

Kecepatan relatif sebelum terjadi tumbukan adalah  $v_2 - v_1$ . Kecepatan relatif adalah kecepatan benda dua dilihat dari benda 1. Persamaan (9) dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ m_2 v_2' - m_2 v_2 &= m_1 v_1 - m_1 v_1' \\ m_2 (v_2' - v_2) &= m_1 (v_1 - v_1') \end{aligned}$$

Hukum kekekalan energi kinetik pada peristiwa ini adalah persamaan (10) dapat diubah menjadi bentuk:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 - \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 \\ m_2 (v_2'^2 - v_2^2) &= m_1 (v_1^2 - v_1'^2) \\ m_2 (v_2' - v_2)(v_2' + v_2) &= m_1 (v_1 - v_1')(v_1 + v_1') \end{aligned}$$

Persamaan kekekalan energi dibagi dengan kekekalan momentum menghasilkan:

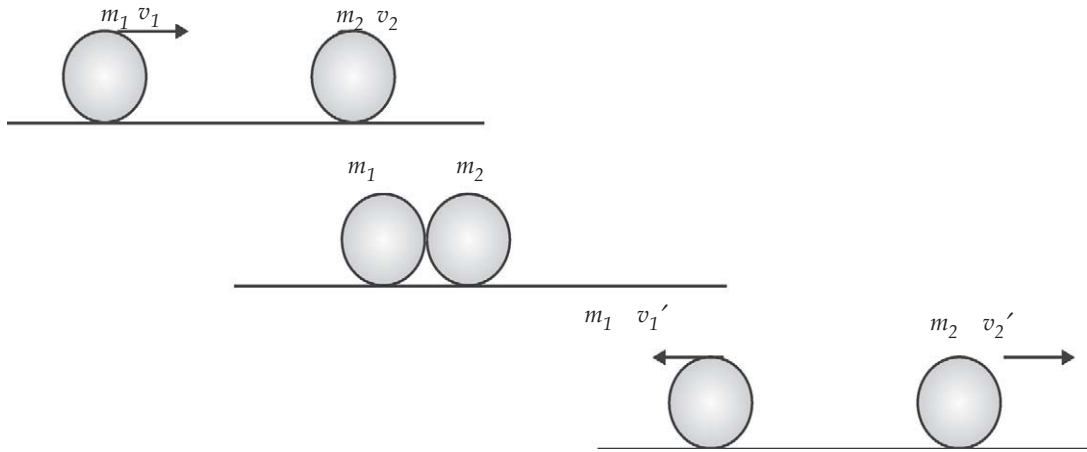
$$\begin{aligned} (v_2' - v_2) &= (v_1 + v_1') \\ v_2' - v_1' &= -(v_2 - v_1) \end{aligned}$$

Ruas sebelah kanan menunjukkan kelajuan relatif setelah tumbukan dan ruas kiri adalah kelajuan relatif sebelum tumbukan. Kelajuan relatif setelah tumbukan sama dengan kelajuan relatif sebelum tumbukan tapi arahnya berlawanan. Sebelum tumbukan benda harus saling mendekat. Tumbukan akan terjadi jika  $v_2 < v_1$ , sehingga suku sebelah kanan positif, yang berarti pada suku sebelah kiri harus  $v_2' > v_1'$  agar bernilai positif atau benda bergerak saling menjauh.

Dengan demikian, kita bisa mengatakan kelajuan relatif mendekat sebelum tumbukan sama dengan kelajuan relatif menjauh setelah tumbukan.

Sebuah benda bermassa  $m_1$  bergerak dengan kelajuan  $v_1$  mengalami tumbukan lenting sempurna dengan benda kedua

bermassa  $m_2$  yang mula-mula dalam keadaan diam. Berapakah kecepatan kedua benda setelah tumbukan?



**Gambar 5.6** Dua benda yang bertumbukan lenting sempurna. Kecepatan relatif mendekat = kecepatan relatif menjauh

Kekekalan momentum pada kasus ini menjadi

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$v_1' = \frac{(m_1 v_1 - m_2 v_2')}{m_1}$$

Kekekalan tenaga kinetik

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$

dengan memasukan  $v_1'$  di atas kita dapatkan

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_1 v_1^2 &= \frac{1}{2} m_1 \frac{(m_1 v_1 - m_2 v_2')^2}{m_1^2} + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 &= \frac{1}{2} \frac{(m_1^2 v_1^2 - 2 m_1 v_1 m_2 v_2' + m_2^2 v_2'^2)}{m_1} + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \\ &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} \frac{m_2^2 v_2'^2 v_1'}{m_1} - \frac{m_1 v_1 m_2 v_2'}{m_1} + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \\ v_1 v_2' &= \frac{1}{2} \frac{(m_2 + m_1) v_2'^2}{m_1} \\ v_2' &= \frac{2 m_1}{(m_2 + m_1)} v_1 \end{aligned}$$



kita mendapatkan hubungan antara  $v_2'$  dengan  $v_1$ .

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2) v_1}{(m_1 + m_2)}$$

- ♦ Jika  $m_1$  jauh lebih besar dari  $m_2$  maka  $m_1 + m_2 \approx m_1$  maka

$$v_2' \approx 2v_1$$

$$v_1' \approx v_1$$

Kecepatan benda pertama tidak banyak berubah, sedangkan benda kedua memiliki kecepatan 2 kali benda pertama. Benda yang masif jika menabrak benda lain yang tidak masif yang diam, maka kecepatannya tidak akan banyak berubah, tapi kecepatan benda yang ditabraknya menjadi besar.

- ♦ Jika  $m_2$  jauh lebih besar dari  $m_1$  ( $m_2 \gg m_1$ ) maka

$$v_1' \approx -v_1$$

- ♦ Jika  $m_1 \approx m_2$  maka

$$v_2' \approx \frac{2m_1}{(m_1 + m_1)} v_1 \approx v_1 \text{ dan } v_1' \approx 0$$

Kecepatan benda kedua sama dengan kecepatan awal benda pertama, dan kecepatan benda pertama mendekati kecepatan mula-mula.



### Semangat Kewirausahaan : Inovatif

Bentuklah kelompok belajar yang terdiri atas 4 - 5 siswa (usahakan yang berbeda agama jika memungkinkan, untuk belajar berbaaur dan toleransi). Setelah kalian mempelajari tumbukan lenting sempurna, apa yang akan kalian lakukan agar memperoleh penghasilan? Coba diskusikan dalam kelompok belajar, kegiatan apa yang dapat kalian lakukan untuk mendapatkan keuntungan tersebut. Berkonsultasilah kepada guru kalian jika menemui kesulitan!

## 2. Tumbukan Tidak Lenting Sempurna

Tumbukan tidak lenting sempurna sering juga disebut tumbukan tak elastik sempurna. Pada peristiwa ini berlaku hukum kekekalan momentum, tetapi hukum kekekalan

tenaga kinetik tidak berlaku. Setelah terjadi tumbukan kedua benda menjadi satu, sehingga persamaan kekekalan momentum menjadi:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)v' \quad \dots \quad (11)$$

Tenaga kinetik awalnya adalah:

$$K = \frac{1}{2} m_1v_1^2 + \frac{1}{2} m_2v_2^2 \quad \dots \quad (12)$$

Tenaga kinetik akhirnya adalah:

$$K' = \frac{1}{2} (m_1 + m_2)v'^2 \quad \dots \quad (13)$$



### Contoh Soal 7

Sebuah benda bermassa  $m_1$  bertumbukan dengan benda kedua bermassa  $m_2$  yang diam. Setelah bertumbukan kedua benda bergerak bersama. Bagaimana tenaga kinetik setelah kedua benda bertumbukan?

**Penyelesaian :**

Pada kasus ini kekekalan momentum menjadi:

$$m_1v_1 = (m_1 + m_2)v'$$

$$v' = \frac{m_1v_1}{(m_1 + m_2)}$$

Tenaga kinetik setelah tumbukan:

$$K' = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( \frac{m_1v_1}{(m_1 + m_2)} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{(m_1v_1)^2}{(m_1 + m_2)}$$

Tenaga kinetik sebelum tumbukan adalah:

$$K = \frac{1}{2} m_1v_1^2$$

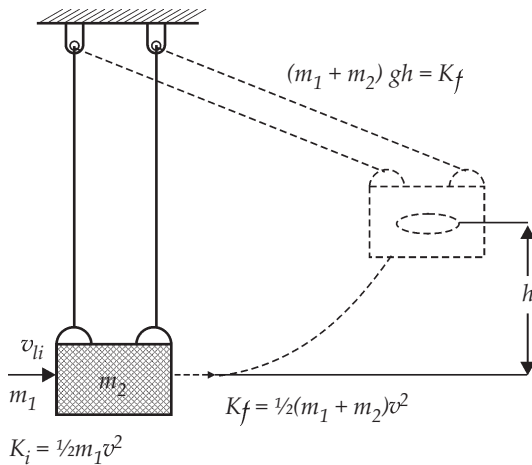
Maka perbandingan antara tenaga akhir dengan tenaga kinetik akhir adalah:

$$\frac{K_{akhir}}{K_{awal}} = \frac{(m_1 v_1)^2}{(m_1 + m_2) m_1 v_1^2} = \frac{m_1}{(m_2 + m_1)}$$

Jadi, tenaga kinetik akhir lebih kecil dari energi kinetik awal.



### Contoh Soal 8



Gambar 5.7 Bandul balistik

Sebuah peluru bermassa  $m_1$  bergerak dengan kelajuan awal  $v_1$  kemudian menumbuk tak elastik sempurna sebuah balok bermassa  $m_2$  yang tergantung seperti bandul. Bandul terayun setinggi  $h$ . Berapa kelajuan peluru? Alat semacam ini bernama bandul balistik, digunakan untuk menentukan kecepatan sebuah peluru.

Kita dapat membagi masalah menjadi dua peristiwa. Peristiwa pertama adalah peristiwa tumbukan dan peristiwa kedua bandul naik ke atas.

Pada peristiwa pertama hukum kekekalan momentum sudut menjadi

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v' = \frac{m_1 v_1}{(m_1 + m_2)}$$

Hukum kekekalan energi kinetik tidak berlaku seperti yang dijelaskan pada contoh 7. Karena mendapat kecepatan awal dari peluru maka bandul bergerak ke atas dengan kecepatan awalnya sama dengan kecepatan akhir peristiwa pertama. Pada peristiwa ini berlaku hukum kekekalan energi mekanik. Keadaan awal pada peristiwa ini hanya memiliki energi kinetik. Setelah bandul bergerak sehingga ketinggiannya  $h$  maka tenaganya adalah potensial

$$K = E_p$$

Energi kinetik awal bandul adalah energi kinetik akhir peristiwa pertama

$$\begin{aligned} K_{\text{awal}} &= \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 \\ &= \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( \frac{m_1 + v_1}{m_1 + m_2} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \end{aligned}$$

Perubahan energi kinetik bandul sama dengan perubahan energi potensialnya sehingga:

$$K = (m_1 + m_2)gh$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = (m_1 + m_2)gh$$

maka

$$v_1^2 = \frac{(m_1 + m_2)^2 gh}{m_1^2}$$

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} \sqrt{gh}$$

Kita telah menemukan kelajuan mula-mula peluru.

### Soal Latihan

Sebuah balok bermassa 4 kg bergerak pada lantai yang licin dengan kelajuan 6 m/det. Balok tersebut melakukan tumbukan elastik dengan balok bermassa 2 kg yang bergerak ke kanan dengan kelajuan 3 m/det. Berapakah kecepatan kedua balok setelah tumbukan? Berapakah tenaga kinetik masing-masing setelah tumbukan?



### Contoh Soal 9

Seorang pemain sepak bola bermassa 85 kg berlari dengan kelajuan 7 m/det bertumbukan dengan penjaga gawang bermassa 105 kg yang mula-mula diam. Berapa kelajuan pemain tepat saat tumbukan?

**Penyelesaian :**

$$\text{Diketahui : } m_1 = 85 \text{ kg} \quad m_2 = 105 \text{ kg} \quad v_1 = 7 \text{ m/det.}$$

Ditanyakan :  $v' = \dots?$

Jawab : Kelajuan akhir setelah tumbukan

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v' = \frac{m_1 v_1}{(m_1 + m_2)}$$

$$v' = \frac{(85)(7)}{(85 + 105)}$$

$$= 1,13 \text{ m/det}$$

Kedua orang bergerak dengan kelajuan 1,13 m/det dengan arah seperti arah pemain pertama.



### Contoh Soal 10

Sebuah balok bermassa 65 kg bergerak ke barat dengan kecepatan 5 m/det, bertumbukan dengan balok lain bermassa 70 kg dari arah barat menuju ke timur dengan kecepatan 3 m/det. Kedua balok tersebut kemudian bergerak bersama-sama. Berapa kecepatan kedua balok setelah bertumbukan?

**Penyelesaian :**

Arah ke barat kita beri tanda negatif maka arah ke timur kita beri tanda positif.

$$\begin{array}{ll} \text{Diketahui : } m_1 = 65 \text{ kg} & m_2 = 70 \text{ kg} \\ v_1 = -5 \text{ m/det} & v_2 = 3 \text{ m/det} \end{array}$$

Ditanyakan :  $v' = \dots ?$

Jawab : Hukum kekekalan momentum

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

$$(65)(-5) + (70)(3) = (65 + 70) v'$$

$$v' = \frac{115}{135} = 0,85 \text{ m/det}$$

Kedua balok tersebut bergerak dengan kelajuan 0,85 m/det ke arah timur.



## Life Skills : Kecakapan Akademik

Mengapa kita perlu mempelajari tumbukan tidak lenting sempurna? Berilah alasan yang terkait dengan kehidupan sehari-hari!

Hasilnya dikumpulkan kepada bapak/ibu guru kalian!

### 3. Tumbukan antara Lenting Sempurna dan Tidak Lenting Sempurna

Peristiwa tumbukan umumnya terjadi antara tumbukan elastis sempurna dan tidak elastis sempurna. Kedua benda terpisah setelah tumbukan, tetapi kecepatan relatif sebelum tumbukan tidak sama dengan kecepatan relatif setelah tumbukan. Tenaga kinetik setelah tumbukan lebih kecil daripada tenaga kinetik total sebelum tumbukan. Keelastikan suatu tumbukan diukur dari koefisien restitusinya yaitu  $e$ .

$$e = \frac{(v_2' - v_1')}{v_2 - v_1}$$

$$= \frac{\text{kecepatan relatif setelah tumbukan}}{\text{kecepatan relatif sebelum tumbukan}}$$

Untuk tumbukan elastik sempurna  $e = 1$ , untuk tumbukan tak elastik sempurna  $e = 0$ . Kecepatan relatif adalah kecepatan  $v_2$  dilihat dari benda 1.



### Contoh Soal 11

Koefisien restitusi lantai dapat ditentukan dengan menjatuhkan bola ke lantai. Bila bola dijatuhkan dari ketinggian 3 m kemudian bola memantul kembali sampai ketinggian 2,5 m. Berapakah koefisien restitusi lantai?

**Penyelesaian :**

Diketahui :  $h_1 = 3 \text{ m}$

$h_2 = 2,5 \text{ m}$

Ditanyakan :  $e = \dots?$

*Jawab* : Bola jatuh ke lantai dengan gerak jatuh bebas. Saat sampai di lantai kecepatan bola adalah:

$$\begin{aligned}v_1 &= \sqrt{2gh} \\&= \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 3} \\&= 7,67 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Bola memantul ke atas dengan ketinggian 2,5 m, maka kecepatan bola tepat saat memantul sama dengan kecepatan saat bola jatuh dari ketinggian 2,5 m.

$$\begin{aligned}v_1' &= \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,5} \\&= 7 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Tumbukan terjadi antara bola dengan lantai, lantai tetap diam sehingga kecepatannya 0. Bola membalik ke atas setelah menumbuk lantai maka arah kecepatannya negatif. Dengan demikian, koefisien restitusi lantai :

$$e = -\frac{-7 - 0}{7,67 - 0} = 0,91$$



### Contoh Soal 12

Sebuah kotak bermassa 3 kg bergerak ke kanan dengan kelajuan 5 m/det, bertumbukan dengan kotak bermassa 5 kg yang bergerak pada arah yang sama dengan kelajuan 2 m/det. Setelah tumbukan kotak bermassa 5 kg bergerak dengan kelajuan 3 m/det

- Berapa kelajuan benda pertama?
- Berapa koefisien restitusi benda?
- Berapa tenaga kinetik yang hilang?

**Penyelesaian :**

$$\begin{aligned}\text{Diketahui : } m_1 &= 3 \text{ kg} \\v_1 &= 5 \text{ m/det} \\m_2 &= 5 \text{ kg} \\v_2 &= 2 \text{ m/det} \\v_2' &= 4 \text{ m/det}\end{aligned}$$

Ditanyakan : a.  $v_1' = \dots ?$

b.  $e = \dots ?$

c.  $K = \dots ?$

Jawab : a. Hukum kekekalan momentum

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$
$$3 \cdot 5 + 5 \cdot 2 = 3 \cdot v_1' + 5 \cdot 4$$

$$v_1' = \frac{15 + 10 - 20}{3}$$
$$= 1,7 \text{ m/det}$$

b. Koefisien restitusi benda

$$e = \frac{(v_2' - v_1')}{v_2 - v_1} = -\frac{4 - 17}{2 - 5}$$
$$= 0,76$$

Jadi koefisien restitusi tumbukan adalah 0,76.

c. Tenaga kinetik yang hilang =

Tenaga kinetik mula-mula :

$$K = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$
$$= \frac{1}{2} (3)(5)^2 + \frac{1}{2} (5)(2)^2$$
$$= 47,5 \text{ J}$$

Tenaga kinetik akhir :

$$K = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$
$$= \frac{1}{2} (3)(1,7)^2 + \frac{1}{2} (5)(4)^2$$
$$= 44,3 \text{ J}$$

Tenaga kinetik yang hilang adalah :

$$K_{awal} - K_{akhir} = 3,2 \text{ J}$$





## Ringkasan

### 1. Impuls

Impuls adalah total gaya yang bekerja selama  $t$  detik.

$$\vec{I} = \sum_n \vec{F}(t) dt$$

Impuls merupakan besaran vektor, memiliki satuan Kgm/detik. Bila  $dt$  sangat kecil mendekati nol maka

$$\vec{I} = \int \vec{F}(x) dt$$

Bila dinyatakan dengan gaya rata-ratanya

$$I = \bar{F} \Delta t = \bar{F} (t_2 - t_1)$$

Impuls menyebabkan terjadinya perubahan momentum

$$\vec{I} = m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0$$

### 2. Momentum

adalah hasil kali antara massa dan kecepatan  $\vec{p} = m\vec{v}$

Hukum Newton kedua bila dinyatakan dalam momentum

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

### 3. Hukum kekekalan momentum

Hukum kekekalan momentum berlaku pada sistem bila gaya neto = 0. Bila  $F_{total} = 0$  berlaku

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$$

### 4. Tumbukan

Pada tumbukan  $F_{total}$  dapat dianggap = 0 sehingga berlaku hukum kekekalan momentum. Ada tiga jenis tumbukan.

### 5. Tumbukan lenting sempurna

Pada tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum dan kekekalan energi mekanik

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$

### 6. Tumbukan tidak lenting sempurna

Pada tumbukan tidak lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum tetapi hukum kekekalan tenaga mekanik tidak berlaku.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}_1'$$

energi kinetik awalnya adalah:

$$K = \frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{1}{2} m v_2^2$$

energi kinetik akhirnya adalah:

$$K = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2$$

Tumbukan antara tumbukan lenting sempurna dan tumbukan tidak lenting sempurna.

Dalam tumbukan ini berlaku hukum kekekalan momentum, tetapi hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Kecepatan relatif sebelum tumbukan tidak sama dengan kecepatan relatif setelah tumbukan. Koefisien restitusi pada tumbukan didefinisikan sebagai

$$e = \frac{(v_2' - v_1')}{v_2 - v_1}$$

Pada tumbukan lenting sempurna koefisien restitusi bernilai satu, pada tumbukan tidak lenting sempurna  $e = 0$ .



## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Bola bergerak jatuh bebas dari ketinggian 1 m dari lantai. Jika koefisien restitusi 0,5 maka tinggi bola setelah tumbukan pertama adalah ....  
A. 2,5 cm  
B. 12,5 cm  
C. 25 cm  
D. 50 cm  
E. 80 cm
2. Seorang anak melompat lepas dari *skate board* yang dinaikinya dengan kecepatan 1 m/det. Bila massa anak 20 kg dan massa *skate board* 2 kg maka besar kecepatan hentakan papan adalah ....  
A. -0,1m/det  
B. -10 m/det  
C. 0,1 m/det  
D. 10 m/det  
E. 20 m/det
3. Sebutir peluru massanya 25 gram ditembakkan dengan kecepatan 200 m/detik. Peluru menembus kayu sedalam 20 cm, maka gaya rata-rata untuk menghentikan peluru adalah ....  
A. 250 N  
B. 1.250 N  
C. 2.500 N  
D. 12.500 N  
E. 25.000 N
4. Sebuah truk yang massanya 2 ton melaju dengan kecepatan 36 km/jam, menabrak sebuah pohon dan berhenti dalam selang waktu 0,1 detik. Gaya rata-rata pada truk selama berlangsungnya tabrakan adalah ....  
A. 200 N  
B. 2.000 N  
C.  $2 \times 10^4$  N  
D.  $2 \times 10^5$  N  
E.  $2 \times 10^6$  N

5. Dua buah benda *A* dan *B* massanya sama. Mula-mula benda *A* bergerak ke kanan dengan kecepatan awal 5 m/det, setelah 2 detik menempuh jarak 14 detik. Pada saat itu *A* dan *B* bertumbukan tak lenting sama sekali. Jika *B* mula-mula bergerak ke kiri dengan kecepatan 15 m/det, maka kecepatan kedua benda setelah tumbukan ....
  - A. 3 m/det ke kiri
  - B. 3 m/det ke kanan
  - C. 6 m/det ke kiri
  - D. 6 m/det ke kanan
  - E. 12 m/det ke kiri
6. Sebutir peluru massanya 0,005 kg ditembakkan pada balok kayu yang terletak pada permukaan datar yang licin. Massa balok kayu 0,035 kg. Bila kemudian peluru bersarang dan bergerak bersama balok kayu dengan kecepatan 10 m/det maka kecepatan peluru saat mengenai balok kayu adalah ....
  - A. 35 m/det
  - B. 40 m/det
  - C. 45 m/det
  - D. 70 m/det
  - E. 80 m/det
7. Sebuah tongkat yang panjangnya 40 cm dan tegak di atas permukaan tanah dijatuhkan martil 10 kg dari ketinggian 50 cm di atas ujungnya. Bila gaya tahan rata-rata  $10^3$  N, maka banyaknya tumbukan martil yang harus dilakukan terhadap tongkat agar menjadi rata dengan permukaan tanah adalah ....
  - A. 4 kali
  - B. 5 kali
  - C. 6 kali
  - D. 8 kali
  - E. 10 kali
8. Sebuah bola dipukul dengan gaya 100 N, sehingga melambung dengan kecepatan 200 m/det. Pemukul menyentuh bola dalam waktu 0,2 detik. Massa bola tersebut adalah ....
  - A. 0,1 kg
  - B. 0,4 kg
  - C. 0,5 kg
  - D. 5 kg
  - E. 10 kg
9. Bola *A* bergerak lurus memiliki momentum  $mv$ , menumbuk bola *B* yang bergerak pada garis yang sama. Jika setelah tumbukan bola *A* mempunyai momentum  $-3 mv$  maka pertambahan momentum bola *B* adalah ....
  - A.  $2 mv$
  - B.  $-2 mv$
  - C.  $3 mv$
  - D.  $-4 mv$
  - E.  $4 mv$

10. Sebuah balok yang massanya 1 kg terikat pada tali yang panjangnya 1 m. Sebuah peluru bermassa 10 gram ditembakkan horisontal mengenai balok tersebut dan diam di dalam balok. Balok terayun setinggi 0,2 m dari keadaan semula. Jika  $g = 10 \text{ m/det}^2$ , kecepatan peluru menumbuk balok adalah ....
- A. 102 m/det
  - B. 200 m/det
  - C. 202 m/det
  - D. 252 m/det
  - E. 302 m/det

**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

1. Sebuah benda bermassa 4 kg dijatuhkan tanpa kecepatan awal dari ketinggian 62,5 m. Jika  $g = 9,8 \text{ m/det}^2$ . Berapa momentum benda saat menumbuk permukaan tanah?
2. Peluru dengan massa 10 gram memiliki kecepatan 1.000 m/det menumbuk sebuah balok bermassa 100 kg yang berada di atas bidang datar yang licin. Kecepatan peluru setelah menembus balok adalah 100 m/det. Berapa kecepatan balok karena tertembus peluru?
3. Sebuah peluru massanya 25 gr ditembakkan dengan kecepatan 200 m/det. Peluru menembus kayu sedalam 20 cm. Berapa gaya rata-rata untuk menghentikan peluru?
4. Seorang pemain sepak bola menendang bola yang diam dengan gaya 100 N. Bila massa bola 0,8 kg, kaki menyentuh bola selama 0,1 detik. Berapa kecepatan bola saat meninggalkan kaki pemain?
5. Sebuah bola bisbol bermassa 0,15 kg dipukul sehingga kecepatannya berubah dari 20 m/det menjadi -20 m/det.
  - a. Berapa impuls yang diberikan oleh pemukul pada bola?
  - b. Jika bola menyentuh pemukul selama 1,3 ms, berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan oleh pemukul pada bola?
6. Sebuah bola tangan yang bermassa 300 g bergerak dengan kelajuan 6,0 m/det menumbuk tembok dengan sudut  $40^\circ$  dan kemudian memantul dengan kelajuan yang sama pada sudut yang sama. Bola menyentuh tembok selama 2 det. Berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan oleh bola pada tembok?

7. Segumpal parafin bermassa 150 dilemparkan secara horizontal dengan kelajuan 5 m/det pada balok yang bermassa 1 kg yang semula diam di atas permukaan yang licin. Jika parafin melekat pada balok, berapakah kelajuan sistem gabungan tersebut?
8. Sebuah balok bermassa 3 kg bergerak ke kanan dengan kelajuan 5 m/det dan balok kedua bermassa 3 kg bergerak ke kiri dengan kelajuan 2 m/det.
  - a. Carilah energi kinetik total kedua balok sebelum terjadi tumbukan!
  - b. Jika antara kedua benda terjadi tumbukan elastik sempurna, berapakah kecepatan akhir kedua balok? Berapakah tenaga kinetik akhir kedua balok?
  - c. Jika antara kedua balok terjadi tumbukan tidak elastik sempurna, carilah kecepatan akhir balok dan tenaga kinetiknya!
9. Sebuah balok bermassa 3 kg bergerak ke kanan dengan kelajuan 5 m/det bertumbukan dengan balok bermassa 5 kg yang mula-mula bergerak ke kanan dengan kelajuan 3 m/det.
  - a. Berapa energi kinetik kedua balok sebelum tumbukan?
  - b. Berapakah kecepatan tiap balok bila tumbukan lenting sempurna, berapa energi kinetik akhirnya?
  - c. Berapa kecepatan kedua benda jika bertumbukan tidak lenting sempurna? Berapa energi kinetik totalnya?
10. Sebuah bola yang dijatuhkan memantul kembali dengan ketinggian 80% dari ketinggian semula.
  - a. Berapa persen energi mekaniknya yang hilang tiap terjadi pantulan?
  - b. Berapa koefisien restitusi sistem bola-lantai?
11. Sebuah peluru bermassa 16 g ditembakkan ke dalam bandul balistik bermassa 1,5 kg. Saat bandul berada pada ketinggian maksimumnya, kawat membentuk sudut  $30^\circ$  dengan vertikal. Panjang bandul 2,3 m. Carilah kelajuan peluru!
12. Sebuah bola bermassa 4 kg dengan kelajuan 8 m/det mengenai seseorang bermassa 85 kg yang diam dan bola langsung memantul kembali dengan kelajuan 2 m/det.
  - a. Carilah kelajuan yang diberikan kepada orang itu oleh tumbukan tersebut!

- b. Apakah tumbukan ini lenting sempurna?
  - c. Bila waktu tumbukan adalah 0,05 det. Berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan pada orang?
13. Sebuah benda 5 kg dengan kelajuan 4,0 m/det menabrak secara sentral sebuah benda bermassa 10 kg yang bergerak ke arahnya dengan kelajuan 3 m/det. Jika setelah tumbukan benda bermassa 10 kg berhenti bergerak.
- a. Berapakah kelajuan akhir benda 5 kg?
  - b. Apakah tumbukan tersebut lenting sempurna?
14. Sebuah benda bermassa 2 kg bergerak dengan kelajuan 3 m/det ke kanan bertabrakan dengan benda 3 kg yang bergerak dengan kelajuan 2 m/det ke kiri. Koefisien restitusinya 0,4. Carilah kecepatan tiap benda setelah tumbukan dan energi kinetik masing-masing benda sebelum dan setelah tumbukan!
15. Sebuah benda bermassa 4 kg bergerak dengan kelajuan 6 m/s bertumbukan dengan benda 6 kg yang semula diam. Setelah tumbukan benda bermassa 4 kg bergerak mundur dengan kelajuan 1 m/det. (a) Carilah kecepatan benda 6 kg setelah tumbukan! (b) Carilah energi yang hilang dalam tumbukan! (c) Berapakah koefisien restitusi untuk tumbukan ini?



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

- 1. impuls,
- 2. momentum linear,
- 3. hukum kekekalan momentum linear, dan
- 4. tumbukan.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.



## Uji Kompetensi Akhir Semester 1

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Suatu partikel bergerak melingkar dengan percepatan sudut 2 rad/det. Kecepatan sudut awalnya adalah 30 rad/det. Setelah 5 detik sudut yang ditempuh partikel adalah ....  
A. 150 rad  
B. 175 rad  
C. 200 rad  
D. 225 rad  
E. 250 rad
2. Peluru A dan B ditembakkan dengan kecepatan awal yang sama, peluru A dengan sudut  $30^\circ$  dan peluru B dengan sudut  $45^\circ$  maka tinggi maksimum peluru A dibanding tinggi maksimum peluru B adalah ....  
A. 1 : 2  
B. 2 : 1  
C. 1 : 3  
D.  $1 : \sqrt{3}$   
E.  $\sqrt{3} : 1$
3. Sebuah satelit diluncurkan ke atas dengan laju awal  $v$ . Jika gesekan dengan udara diabaikan, massa bumi =  $M$ , massa satelit =  $m$ , dan jari-jari bumi =  $R$ , maka agar satelit itu tidak kembali ke bumi,  $v^2$  berbanding lurus dengan ....  
A.  $\frac{Mm}{R}$   
B.  $\frac{M}{R}$   
C.  $M^2R$   
D.  $MR$   
E.  $MmR$
4. Peluru ditembakkan condong ke atas dengan kecepatan awal  $v = 1,4 \times 10^3$  m/det dan mengenai sasaran yang jarak mendatarnya  $2 \times 10^6$  m. Bila percepatan gravitasi 9,8 m/det<sup>2</sup>, maka sudut elevasinya  $n$  derajat dengan  $n$  adalah ....  
A. 30  
B. 45  
C. 60  
D. 75  
E. 110

- | $\Delta y$ (m) | $W(N)$ |
|----------------|--------|
| 0,02           | 20     |
| 0,04           | 40     |
| 0,06           | 60     |




A.  $\frac{5}{\pi}$  Hz

B.  $\frac{7}{\pi}$  Hz

C.  $\frac{12}{\pi}$  Hz

D.  $\frac{14}{\pi}$  Hz

E.  $\frac{15}{\pi}$  Hz

12. 

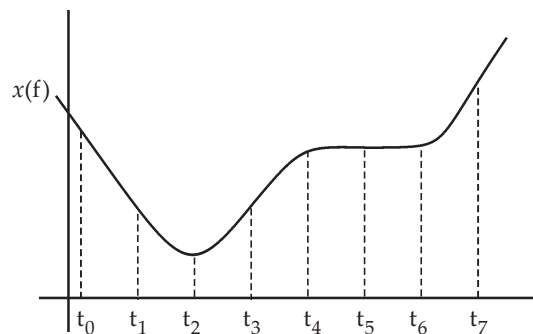
A.  $1,25 \times 10^{-3}$  J                      D.  $3,15 \times 10^{-3}$  J  
B.  $1,56 \times 10^{-3}$  J                      E.  $3,15 \times 10^{-3}$  J  
C.  $3,13 \times 10^{-3}$  J

13. Sebuah peluru dengan massa 20 gram ditembakkan dengan sudut elevasi  $30^\circ$  dan dengan kecepatan 40 m/det. Jika gesekan dengan udara diabaikan maka energi potensial peluru pada titik tertinggi adalah ....
- A. 2 J
  - B. 4 J
  - C. 5 J
  - D. 6 J
  - E. 8 J
14. Di antara kasus berikut ini:
- (1) air yang berada di tempat yang tinggi
  - (2) busur panah yang teregang
  - (3) bola yang menggelinding di lantai,
- Yang memiliki energi potensial adalah benda pada kasus ....
- A. (1)
  - B. (1) dan (2)
  - C. (2)
  - D. (2) dan (3)
  - E. (3)
15. Jari-jari bumi adalah  $6,4 \times 10^6$  m dan percepatan gravitasi di permukaan bumi adalah  $10 \text{ m/det}^2$ . Kecepatan minimal yang dibutuhkan pesawat ruang angkasa agar dapat terlepas dari pengaruh gravitasi adalah ....
- A.  $10^3 \text{ m/det}$
  - B.  $4 \times 10^3 \text{ m/det}$
  - C.  $4\sqrt{2} \times 10^3 \text{ m/det}$
  - D.  $8 \times 10^3 \text{ m/det}$
  - E.  $8\sqrt{2} \times 10^3 \text{ m/det}$

**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

- 1. Pada  $t = 5$  detik sebuah benda bergerak dengan kecepatan 5 m/det. Pada saat  $t = 8$  detik kecepatannya adalah  $-1 \text{ m/det}$ . Hitunglah percepatan rata-rata untuk selang ini!
- 2. Sebuah benda dengan percepatan konstan mempunyai kecepatan  $v = 10 \text{ m/det}$  saat benda berada pada  $x = 6 \text{ m}$  dan  $v = 15 \text{ m/det}$  ketika benda berada pada  $x = 10 \text{ m}$ . Berapakah percepatannya?

3. Sebuah peluru ditembakkan dari senapan lurus ke atas dengan kelajuan tembakan 300 m/det. Dengan mengabaikan gesekan udara, seberapa tinggikah peluru itu naik?
4. Posisi sebuah partikel bergantung pada waktu menurut  $x = (1 \text{ m/det}^2)t^2 - (5 \text{ m/det})t + 1 \text{ m}$ .
  - a. Carilah perpindahan dan kecepatan rata-rata untuk selang  $t = 3$  detik sampai  $t = 4$  detik!
  - b. Carilah kecepatan sesaat untuk setiap saat!
5. Percepatan sebuah roket adalah  $a = Ct$ , dengan  $C$  adalah konstanta.
  - a. Carilah fungsi posisi  $x(t)$ !
  - b. Carilah posisi dan kecepatan pada  $t = 5 \text{ s}$  jika  $x = 0$  dan  $v = 0$  pada  $t = 0$  dan  $C = 3 \text{ m/s}^3$ !
6. Gambar di bawah menunjukkan posisi sebuah mobil sebagai fungsi waktu. Pada tiap-tiap  $t$  carilah :
  - a. kecepatan negatif
  - b. kecepatan positif
  - c. kecepatan nol
  - d. percepatan negatif
  - e. percepatan positif
  - f. percepatan nol

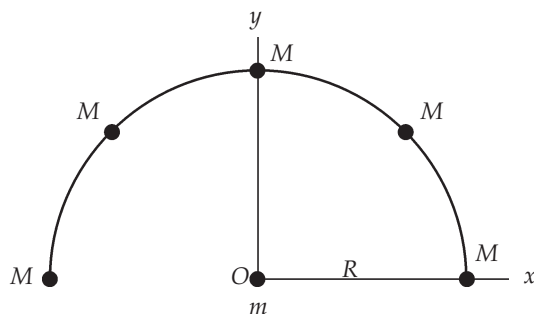


7. Sebuah motor polisi mengejar seorang pengebut yang bergerak dengan kelajuan 125 km/jam. Kelajuan maksimum motor polisi adalah 190 km/jam. Motor polisi bergerak dari keadaan diam dengan percepatan konstan 8 km/jam sampai kelajuannya mencapai 190 km/jam. Motor kemudian bergerak dengan kelajuan konstan.
  - a. Kapanakah motor polisi menyusul pengebut jika motor polisi berangkat tepat saat pengebut melewatinya?
  - b. Berapakah jarak yang ditempuh oleh dua sepeda motor tersebut?

8. Seorang penumpang berlari mengejar kereta api dengan kecepatan maksimum 8 m/det. Ketika berada sejauh  $d$  dari pintu masuk kereta, kereta berangkat dengan percepatan konstan  $a = 10 \text{ m/det}^2$  dari keadaan diam.
  - a. Jika  $d = 30 \text{ cm}$  dan penumpang terus berlari, apakah ia dapat melompat ke dalam kereta?
  - b. Untuk jarak pisah kritis  $d_c$  berapakah kelajuan kereta ketika penumpang menyusul? Berapakah kelajuan rata-rata kereta untuk selang waktu dari  $t = 0$  sampai dia menyusul? Berapakah nilai  $d_c$ ?
9. Sebuah peluru ditembakkan secara mendatar dengan kecepatan awal 245 m/det. Senapan berada 1,5 m di atas tanah. Berapa lama peluru berada di udara?
10. Laras penembak meriam diarahkan membentuk sudut  $45^\circ$ . Meriam menembakkan bola peluru dengan kelajuan 300 m/det.
  - a. Berapa ketinggian yang dicapai bola peluru?
  - b. Berapa lama bola peluru di udara?
  - c. Berapa jangkauan horizontalnya?
11. Sebuah proyektil ditembakkan dengan kecepatan awal 30 m/det dengan arah  $60^\circ$  terhadap horizontal. Berapakah kecepatan proyektil pada titik tertingginya? Berapa percepatannya?
12. Sebuah batu yang dilemparkan secara horizontal dari puncak sebuah menara sampai di permukaan tanah dengan jarak 18 m dari dasar menara.
  - a. Berapa kelajuan batu dilemparkan jika tinggi menara 24 m?
  - b. Carilah kelajuan batu tepat sebelum mengenai tanah!
13. Sebuah proyektil ditembakkan ke udara dari puncak tebing setinggi 200 m di atas sebuah lembah. Kecepatan awalnya adalah 60 m/det, membentuk sudut  $60^\circ$  dari horizontal. Jika kita mengabaikan gesekan udara, di manakah proyektil mendarat? Berapa kecepatannya?
14. Sebuah senapan menembakkan peluru yang meninggalkan laras dengan kelajuan 250 m/det. Jika peluru harus mengenai sasaran yang jauhnya 100 m pada ketinggian yang sama dengan tinggi laras, senapan harus dibidikkan ke arah sebuah titik di atas sasaran. Berapa jauh di atas sasaran titik ini berada?

15. Sebuah partikel menempuh lintasan melingkar berjari-jari 5 m dengan kelajuan konstan 15 m/det. Berapakah besar percepatan partikel?
16. Sebuah benda bergerak dengan kelajuan konstan  $v$  melalui lintasan berjari-jari  $r$ .
  - a. Jika  $v$  dijadikan dua kali lipat, bagaimana pengaruhnya terhadap percepatan  $a$ ?
  - b. Jika  $r$  diduakalikan, bagaimanakah pengaruhnya terhadap percepatan  $a$ ? Mengapa sebuah benda tidak mungkin bergerak mengelilingi sebuah belokan dengan sempurna?
17. Seorang anak memutar sebuah bola yang terikat pada tali sehingga bola bergerak melingkar dengan jari-jari 1 m. Berapa putaran tiap menit yang harus dibuat bola jika percepatan ke pusat lingkaran harus memiliki besar yang sama dengan percepatan gravitasi?
18. Sebuah partikel bergerak dengan lintasan berupa lingkaran dengan jari-jari 100 m dengan kelajuan konstan 20 m/det.
  - a. Berapa kecepatan sudutnya terhadap pusat lingkaran dalam satuan radian per detik?
  - b. Berapa putaran yang dilakukan dalam 30 detik?
19. Seekor lalat berada di tepi cakram berjari-jari 10 cm yang berputar terhadap sumbunya dengan percepatan sudut konstan sebesar  $10 \text{ rad/det}^2$ . Saat  $t = 5 \text{ det}$ , berapakah :
  - a. Kecepatan sudut lalat?
  - b. Berapakah percepatan sentripetal dan percepatan tangensial di sebuah titik di tepi cakram?
20. Sebuah roda mula-mula diam kemudian diputar sehingga memiliki percepatan sudut konstan. Setelah 10 detik, roda melakukan putaran. (a) Berapa percepatan sudut roda? (b) Berapa kecepatan sudut roda setelah 10 detik? (c) Jika jari-jari roda 36 cm dan roda mengelinding tanpa selip, berapa jarak yang ditempuh pengendara sepeda dalam 10 detik?
21. Sebuah mobil hendak menyeberangi sebuah selokan yang lebarnya 4,0 m. Perbedaan tinggi antara kedua sisi parit itu adalah 15 cm. Jika percepatan gravitasi  $9,8 \text{ m/det}^2$ . Berapa besarnya kelajuan minimum yang diperlukan oleh mobil agar mobil dapat menyeberang?

22. Lima massa  $M$  yang sama berada pada busur seperti pada gambar di bawah, yang berjari-jari  $R$ . Sebuah massa  $m$  diletakkan di pusat kelengkungan busur tersebut. Jika  $M$  adalah 3 kg,  $m$  adalah 2 kg, dan  $R = 10$  cm, berapakah gaya pada  $m$  yang disebabkan kelima massa tersebut?



23. Di permukaan bumi berat seorang pramugari adalah 800 N. Pramugari tersebut kemudian naik pesawat udara sampai ketinggian 15.000 m. Berapakah hilangnya berat pramugari?
24. Sebuah satelit bermassa 750 N hendak diletakkan pada orbitnya. Berapa jarak satelit dengan bumi agar satelit mengelilingi bumi dengan periode yang sama dengan rotasi bumi?
25. Posisi partikel diberikan oleh  $x = (5 \text{ cm}) \cos 4\pi t$ .  $t$  dalam detik.
- Berapakah frekuensinya?
  - Berapakah periodenya?
  - Berapakah amplitudo gerak partikelnya?
  - Kapankah setelah  $t = 0$  partikel pertama kali berada pada posisi kesetimbangannya? Ke arah manakah partikel bergerak pada waktu itu?
26. Sebuah benda memiliki massa 3 kg, tergantung pada pegas vertikal yang memiliki konstanta pegas 600 N/m. Benda berosilasi dengan laju maksimum 30 cm/det. Berapakah simpangan maksimumnya?
27. Sebuah pegas digantung secara vertikal. Sebuah benda dengan massa tak diketahui digantung pada ujung pegas yang tidak tergantung dan dilepas dari keadaan diam. Jika benda itu terjatuh 3,42 cm sebelum diam, hitunglah periode geraknya!

28. Sebuah balok yang digantung pada sebuah pegas ber-  
osilasi secara vertikal dengan frekuensi 4 Hz dan  
amplitudo 7 cm. Sebuah batu yang sangat kecil ditempat-  
kan di bagian atas balok yang berosilasi saat mencapai  
titik terendahnya. Anggaplah bawah batu tidak  
berpengaruh pada osilasi.
- Pada jarak berapa di atas posisi kesetimbangan balok,  
batu kehilangan kontak dengan balok?
  - Berapakah kecepatan batu ketika meninggalkan  
balok?
  - Berapakah jarak terbesar di atas posisi kesetimbangan  
balok yang dicapai oleh batu?
29. Sebuah bola tangan bermassa 300 g dilemparkan lurus  
ke arah sebuah tembok dengan kelajuan 8 m/det. Bola  
memantul dengan kelajuan sama.
- Berapakah impuls yang diberikan bola pada tembok?
  - Jika bola menyentuh tembok selama 0,003 det,  
berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan pada  
tembok?
  - Bola ditangkap oleh seorang pemain yang menjadi-  
kan bola terhenti. Selama menangkap bola, tangan  
mudur 0,5 m. Berapakah impuls yang diterima  
pemain?
  - Berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan pada  
pemain oleh bola?
30. Segenggam tanah liat bermassa 0,4 g dilemparkan  
mengenai sebuah balok bermassa 12 kg yang diam se-  
hingga balok bersama tanah liat bergerak dengan sejauh  
15 cm pada lantai yang memiliki koefisien gesek 0,4.  
Berapakah kelajuan awal tanah liat?



## Bab VI

# Dinamika Rotasi

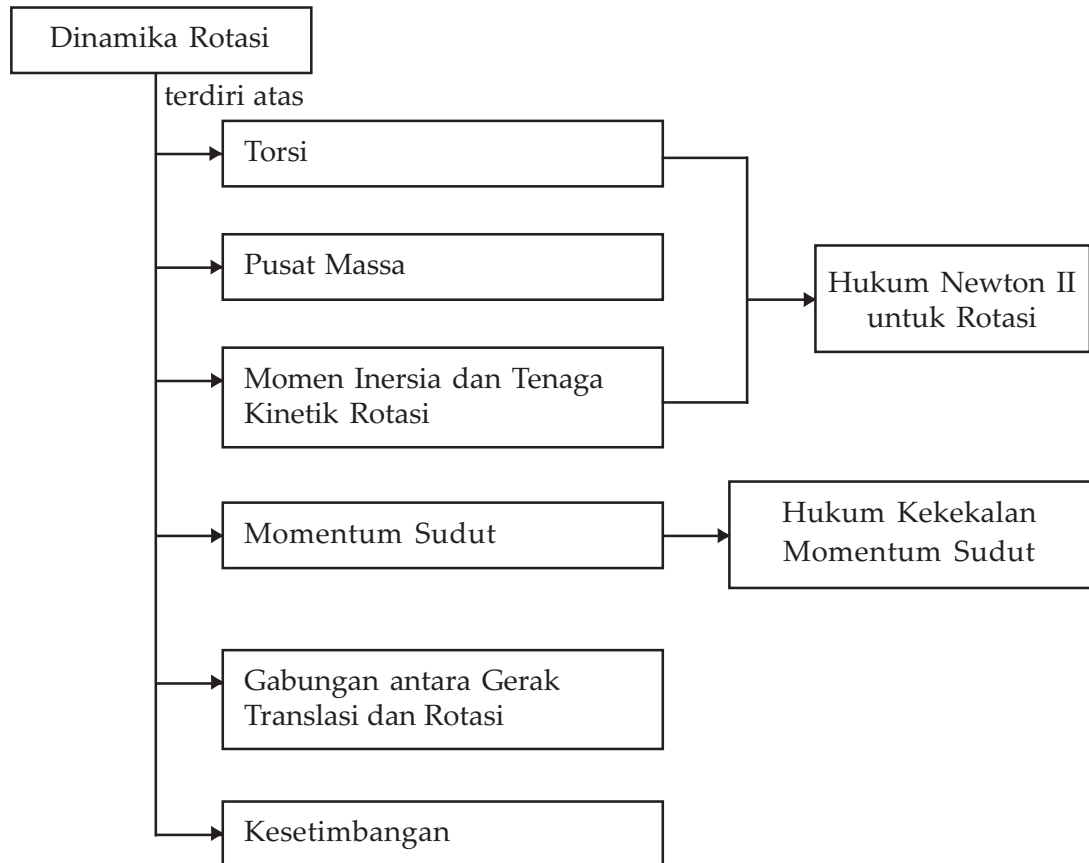


Sumber : Internet : [www.trade center.com](http://www.trade center.com)

*Adanya gaya merupakan faktor penyebab terjadinya gerak translasi. Bianglala yang berputar terjadi karena kecenderungan untuk mempertahankan keadaannya. Dalam gerak rotasi, penyebab berputarnya benda merupakan momen gaya atau torsi.*



# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini diharapkan kalian mampu :

1. menganalisis gerak rotasi dan menyelesaikan masalah yang berkaitan dengan rotasi, dan
2. memahami konsep torsi, momentum sudut, momen inersia, tenaga kinetik rotasi, dan memformulasikannya berdasarkan hukum II Newton serta menerapkannya dalam masalah benda tegar.



## Motivasi Belajar

Pada bab ini akan dibahas tentang dinamika rotasi benda tegar. Benda tegar adalah sistem yang terdiri atas banyak partikel dan jarak antarpartikel tersebut tetap. Sistem benda titik dan benda tegar berbeda. Kita akan membahas apa yang terjadi pada benda tegar bila dikenai gaya. Benda tegar memiliki sebuah titik yang disebut titik pusat massa. Gerakan pusat massa benda tegar seperti gerakan benda titik. Momen inersia setara dengan massa pada gerak translasi. Benda yang berotasi memiliki kecepatan sudut dan tenaga kinetik rotasi, sedangkan benda yang bertranslasi memiliki kecepatan linear dan tenaga kinetik translasi. Untuk mengetahui lebih lanjut tentang dinamika rotasi, maka pelajailah materi bab ini dengan saksama.



## Kata-kata Kunci

torsi, momen inersia, momentum sudut, hukum kekekalan momentum sudut, kesetimbangan, menggelinding

### A. Torsi



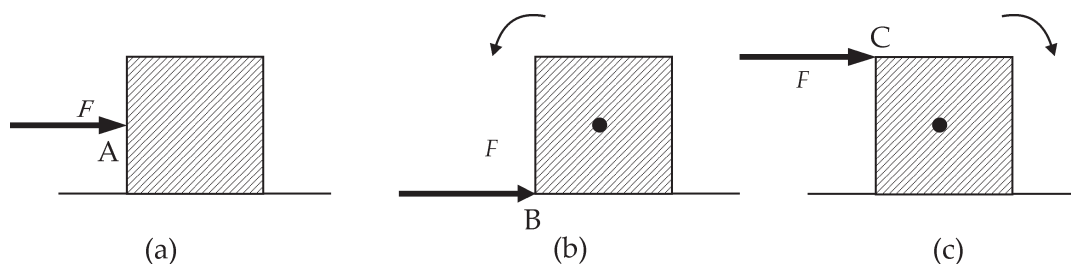
Sumber : Penerbit

**Gambar 6.1** Jika kita mendorong pintu atau kita memberi gaya pada ujung pintu, pintu akan berputar.

Perhatikan pada sebuah pintu, coba bandingkan apabila kalian mendorong pintu pada ujung pintu dengan kalian mendorong pada bagian tengah pintu. Mana yang lebih mudah untuk membuka pintu? Kalian akan merasakan gaya yang diperlukan untuk mendorong pintu agar terbuka akan lebih ringan apabila dibandingkan dengan mendorong di ujung pintu.

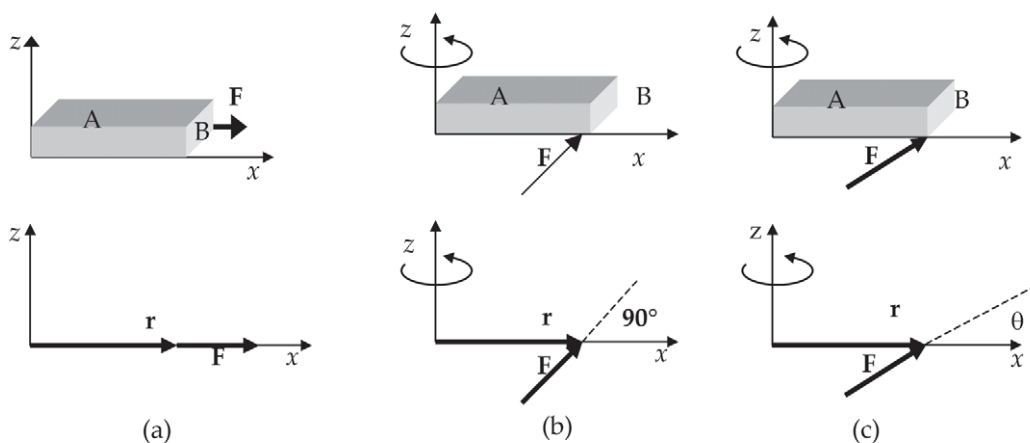
Jika pada sebuah benda diberikan gaya sebesar  $F$  maka benda akan memiliki percepatan yang disebabkan oleh gaya tersebut. Percepatan benda memiliki arah yang sama dengan arah gaya yang diberikan padanya. Bagaimana dengan benda yang berotasi? Bagaimana gayanya? Sebuah benda akan berotasi bila dikenai torsi. Torsi sama dengan

gaya pada gerak translasi. Torsi menunjukkan kemampuan sebuah gaya untuk membuat benda melakukan gerak rotasi.



**Gambar 6.2** (a) sebuah balok diberi gaya  $F$ , benda akan bertranslasi, jika balok di bagian tengah dipaku sehingga balok tidak dapat bertranslasi tapi dapat berotasi, (b) bila gaya diberikan pada sudut B benda akan berotasi, dengan arah berbeda dengan (b), (c) begitu juga bila diberikan pada sudut C

Besarnya torsi tergantung pada gaya yang dikeluarkan serta jarak antara sumbu putaran dan letak gaya. Mari kita tinjau sebuah batang dengan salah satu ujungnya berupa engsel tetapi masih bisa bergerak memutar. Misalnya ujung yang dipatri adalah ujung yang kita letakan di titik  $(0,0,0)$  dan ujung satunya merupakan ujung yang bebas adalah ujung satunya. Batang kita letakan pada sumbu  $x$ .



**Gambar 6.3** Benda dengan salah satu ujungnya berupa engsel sehingga tidak dapat bertranslasi tapi bisa berotasi. Diberi gaya dengan berbagai arah. Ditunjukkan juga skema gaya dan posisinya. (a) arah  $r$  sejajar dengan arah  $F$ , (b) arah  $r$  tegak lurus dengan arah  $F$ , (c). arah  $r$  membentuk sudut  $\theta$  terhadap  $F$ .

### Renungkanlah hal-hal ini:

- Jika pada ujung yang tidak dipatri kita beri gaya yang searah dengan arah sumbu  $x$  apa yang terjadi?
- Bagaimana jika batang kita beri gaya yang tegak lurus batang apa yang terjadi?

### Hasilnya :

Jika gaya yang kita berikan sejajar dengan arah batang ternyata batang tidak berotasi. Kalian dapat melihat skema pada Gambar (6.3a). Jika arah gaya tegak lurus maka batang akan berotasi. Seperti yang ditunjukkan Gambar (6.3b).

- Bagaimana kalau gaya membentuk sudut  $\theta$  yang besarnya sembarang dengan batang?

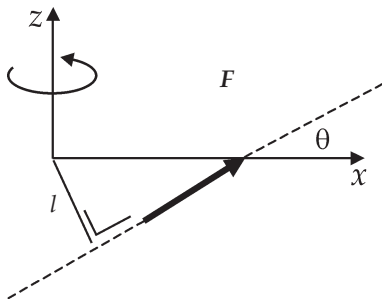
Jika gaya membentuk sudut sembarang terhadap batang, benda akan berotasi tetapi percepatan sudut yang dihasilkan akan berbeda dengan jika sudutnya tegak lurus. Hal itu ditunjukkan pada Gambar (6.3c). Perhatikanlah arah putaran akan berlawanan bila gaya yang diberikan berlawanan arah.

Torsi disebut juga momen gaya dan merupakan besaran vektor. Torsi adalah hasil perkalian silang antara vektor posisi  $\vec{r}$  dengan gaya  $\vec{F}$ , dapat dituliskan

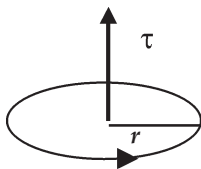
$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad \dots \quad (1)$$

besarnya torsi adalah:

$$\tau = rF \sin \theta \quad \dots \quad (2)$$



**Gambar 6.4a** Besarnya torsi tergantung pada besar gaya dan lengan gaya. Besar lengan gaya  $l$  tergantung pada sudut antar vektor  $\vec{r}$  dan  $\vec{F}$ . Arah torsi ke arah sumbu  $y$  positif, besar  $l$  adalah  $r \sin \theta$ .



**Gambar 6.4b** Putaran tangan kanan

Pada batang di atas vektor  $\vec{r}$  adalah vektor yang berawal di ujung batang yang dipatri dan berujung atau berarah di ujung yang lainnya. Bila gaya tegak lurus maka  $\theta = 90$  sehingga nilai  $\sin \theta = 1$ . Torsi yang dilakukan pada batang maksimal. Bila  $\vec{F}$  sejajar dengan  $\vec{r}$ , maka nilai  $\sin \theta = 0$  sehingga besarnya torsi 0 dan batang tidak berotasi. Besar torsi dapat kita tuliskan sebagai:

$$\tau = \ell F \quad \dots \quad (3)$$

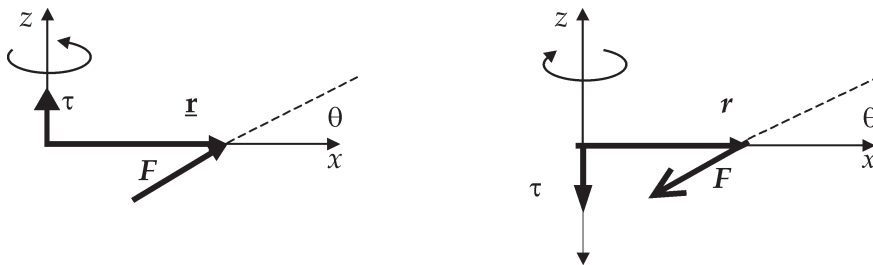
dengan  $\ell = r \sin \theta$

Lengan torsi ditunjukkan oleh  $l$ . Lengan torsi sebuah gaya didefinisikan

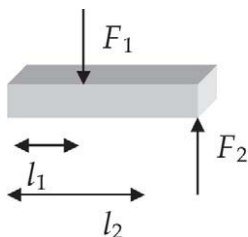
sebagai panjang garis yang ditarik di titik sumbu rotasi sampai memotong tegak lurus garis kerja gaya. Kalian dapat melihatnya pada Gambar (6.4a).

Perhatikan dengan arah torsi, arah torsi mengikuti aturan putaran tangan kanan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (6.4b).

Jika arah putaran berlawanan dengan arah jarum jam maka arah torsi ke atas, dan arah bila arah putaran searah dengan arah putaran jarum jam maka arah torsi ke bawah. Kita dapat melihatnya dengan sebuah sistem koordinat. Bila batang terletak pada sumbu  $x$  dan pangkal vektor  $\mathbf{r}$  di titik  $(0,0,0)$ . Gaya pada arah sumbu  $y$  positif batang akan berputar melawan arah jarum jam, arah torsi ke arah sumbu  $z$  positif. Sebaliknya bila arah gaya ke arah sumbu  $y$  negatif, putaran batang berlawanan dengan arah jarum jam, arah torsi ke sumbu  $z$  negatif. Jika arah gaya tidak tepat pada arah sumbu  $y$  tetapi membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu  $x$ , maka arah torsi dapat dilihat pada Gambar (6.5).



**Gambar 6.5** Arah torsi untuk  $F$  berarah sembarang. Arah sumbu  $y$  positif adalah arah masuk bidang gambar. (a) torsi memiliki arah ke sumbu  $z$  positif, tetapi arah putarannya berlawanan arah dengan arah jarum jam, (b) arah torsi ke sumbu  $z$  negatif, arah putarannya searah dengan arah jarum jam.



**Gambar 6.6** Pada batang dengan titik tumpu pada ujung kiri batang, ada dua gaya yang bekerja pada batang.

Jika pada sebuah benda bekerja lebih dari satu torsi bagaimana dengan gerakan benda? Jika pada benda bekerja lebih dari 1 torsi maka torsi total adalah jumlahan dari seluruh torsi yang bekerja.

Pada Gambar (6.6) gaya  $F_1$  akan menyebabkan batang berputar searah dengan jarum jam, gaya  $F_2$  akan menyebabkan benda berputar berlawanan arah dengan arah jarum jam. Torsi total adalah jumlah kedua torsi tersebut.

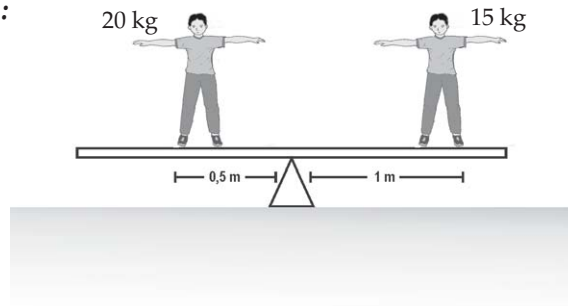
$$\sum \tau = \tau_1 - \tau_2 = l_1 F_1 - l_2 F_2 \quad \dots \quad (4)$$



## Contoh Soal 1

Salah satu ujung sebuah jungkat-jungkit dinaiki anak yang beratnya 15 kg. Ujung satunya dinaiki anak yang beratnya 20 kg. Jarak masing-masing anak dari titik tumpu adalah 1 m dan 0,5 m. Berapa torsi masing masing, dan berapa torsi totalnya? Ke mana arah putaran batang ?

**Penyelesaian :**



Agar jungkat-jungkit tidak bergerak ke atas atau ke bawah maka total gaya vertikal ke bawah harus sama dengan sama dengan gaya normal pada penumpang jungkat-jungkit.

Jika kita misalkan massa 15 kg mengakibatkan torsi 1 dan massa 20 kg menyebabkan torsi 2 maka:

$$\tau_1 = (1 \text{ m})(15 \text{ kg})(9,8 \text{ m/det}^2) = 147 \text{ Nm}$$

$$\tau_2 = (0,5 \text{ m})(20 \text{ kg})(9,8 \text{ m/det}^2) = 98 \text{ Nm}$$

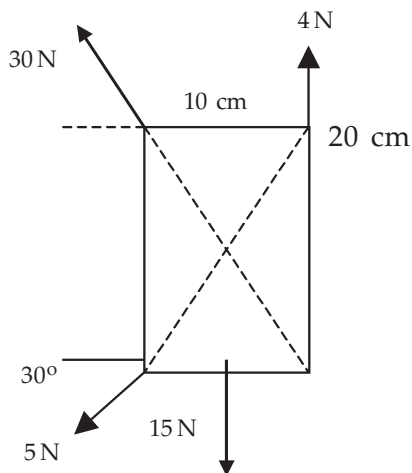
Torsi satu membuat jungkat jungkit bergerak searah arah jarum jam, torsi kedua membuat jungkat-jungkit bergerak berlawanan arah jarum jam. Besar torsi total adalah :

$$\tau_1 - \tau_2 = 147 - 98 = 49 \text{ Nm, arah putaran searah jarum jam.}$$



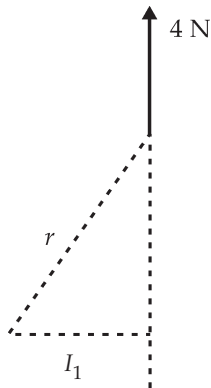
## Wawasan Kewirausahaan : Etos Kerja

Pernahkah kalian melihat jungkat-jungkit di sekolah taman kanak-kanak? Jika belum, berkunjunglah ke sekolah yang mempunyai mainan jungkat jungkit. Setelah memahami proses kerja jungkat-jungkit tersebut, dapatkah kalian menerapkan pengetahuan tentang dinamika rotasi untuk kepentingan lain yang dapat menghasilkan uang? Apakah yang akan kalian lakukan? Berkonsultasilah dengan orang tuamu atau gurumu!

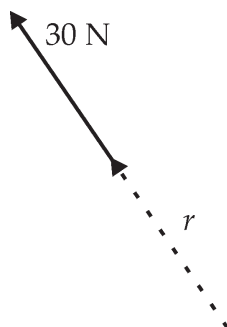


Perhatikan gambar di samping ini. Bagaimana kita menentukan torsi pada tiap gayanya? Berapakah torsi totalnya? Menentukan torsi pada tiap gaya bila bidang dikenai gaya seperti pada gambar dan bidang dapat berotasi pada sumbu yang tegak lurus bidang dan berada di tengah bidang.

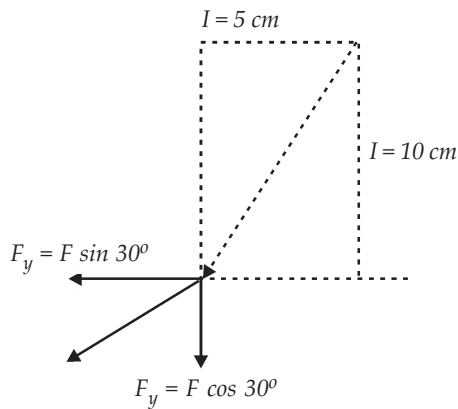
Torsi yang menyebabkan benda berputar searah jarum jam kita beri tanda positif dan arah benda berlawanan arah jarum jam bertanda negatif. Mari kita lihat pengaruh tiap-tiap gaya pada bidang.



- ◆ Gaya 4 N  
 $r$  berawal dari pusat bidang berakhir di titik sudut bidang.  
 Lengan torsi gaya ini  $l_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$ .  
 Torsi yang ditimbulkan  
 $\tau = -(0,05 \text{ m})(4\text{N}) = -0,2 \text{ Nm}$



- ◆ Gaya 30 N  
 $r$  berawal dari pusat bidang ke ujung titik sudut bidang.  
 $r$  searah dengan gaya maka besarnya lengan torsi 0.  
 Sudut antara  $r$  dan gaya 0. Torsi yang diakibatkan adalah 0.



#### ♦ Gaya 5 Newton

Gaya 5 N bisa kita uraikan pada sumbu vertikal dan sumbu mendatar

$$F_y = 5 \sin 30 = (5) (0,5) \text{ N} = 2,5 \text{ N}$$

$$F_x = 5 \cos 30 = (5) (0,87) = 4,3 \text{ N}$$

Lengan torsi untuk  $F_x$  adalah 10 cm, torsi yang ditimbulkan

$$\tau = (0,10 \text{ m}) (4,3 \text{ N}) = 0,43 \text{ Nm.}$$

Lengan torsi untuk  $F_y$  adalah 5 cm, torsi yang ditimbulkannya

$$\tau = -(0,05 \text{ m}) (2,5 \text{ N}) = -0,125 \text{ Nm.}$$

#### ♦ Gaya 15 N

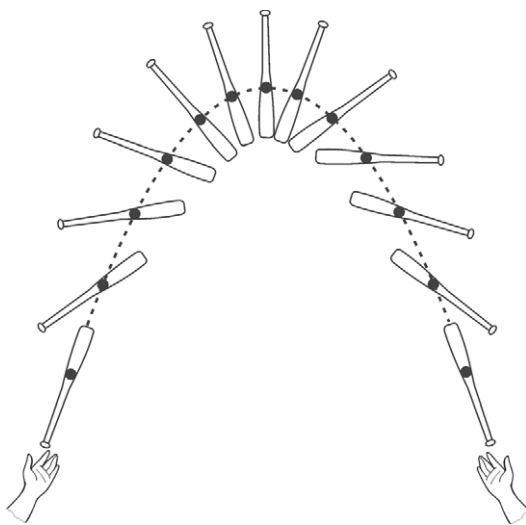
Arah gaya sama dengan arah  $r$  maka torsi yang ditimbulkan adalah 0.

Total torsi adalah:

$$-0,2 \text{ Nm} + 0 + 0,43 \text{ Nm} - 0,125 \text{ Nm} + 0 = 0,105 \text{ Nm.}$$

Torsi total positif jadi bidang berotasi searah dengan arah jarum jam. Namun arah torsi masuk ke dalam bidang.

## B. Pusat Massa



Gambar 6.7 (a) Pemukul base ball yang dilempar

Pemukul *base ball* jika dilempar keseluruhan titik akan bergerak. Ada sebuah titik yang gerakannya seperti gerak partikel yaitu gerak parabola. Ujung pemukul yang mula-mula di bawah saat dipuncak gerakan ujung tersebut berada di bagian bawah. Ujung tersebut bergerak memutar. Tapi ada titik pada pemukul yang gerakannya seperti gerak partikel. Titik tersebut dinamakan sebagai titik pusat massa.

Jika kita memiliki sebuah sistem yang terdiri atas 2 massa, massa 1 di titik  $x_1$  dan massa 2 di titik  $x_2$ . Pusat massa sistem terletak di titik tengah.





$$x_{pm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2} \quad \dots \quad (5)$$

Gambar 6.7 (b) Sistem yang terdiri dari 2 massa, jika  $m_1 = m_2$  maka pusat massa terletak di tengah-tengah.

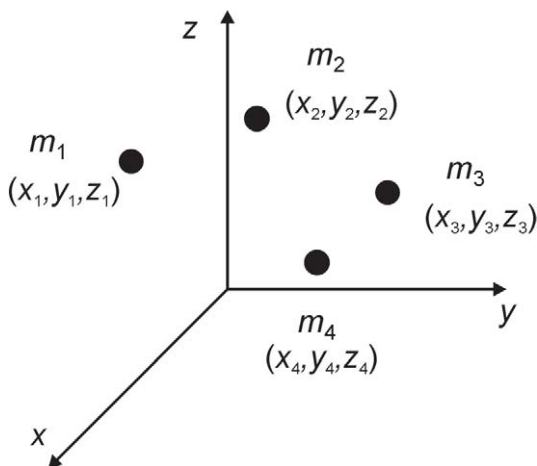
Bila sistem terdiri atas banyak benda bermassa maka pusat massa sistem adalah:

$$x_{pm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n m_n}{M} \quad \dots \quad (6)$$

Begitu juga komponen ke arah sumbu  $y$  dan  $z$

$$y_{pm} = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2 + \dots + y_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{n=1}^N y_n m_n}{M} \quad \dots \quad (7)$$

$$z_{pm} = \frac{z_1 m_1 + z_2 m_2 + \dots + z_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{n=1}^N z_n m_n}{M} \quad \dots \quad (8)$$



Sistem yang terdiri dari 4 massa (gambar 6.8), masing-masing:

$m_1$  pada posisi  $(x_1, y_1, z_1)$

$m_2$  pada posisi  $(x_2, y_2, z_2)$

$m_3$  pada posisi  $(x_3, y_3, z_3)$

$m_4$  pada posisi  $(x_4, y_4, z_4)$

Pusat massa sistem dapat dicari dengan persamaan (6), (7), (8).

Gambar 6.8 Sistem terdiri dari 4 massa

Jika sistem kita adalah sistem yang kontinu, misalkan sebuah balok, di manakah titik pusat massa balok? Kita dapat membagi menjadi bagian yang kecil-kecil yang tiap bagiannya bermassa  $dm$ .  $\Sigma$  akan berubah menjadi integral. Pusat massa sistem adalah

$$x_{pm} = \frac{\int x dm}{M}$$

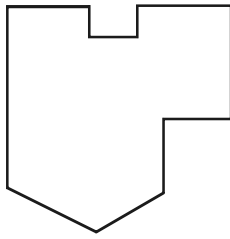
$$y_{pm} = \frac{\int y dm}{M}$$

$$z_{pm} = \frac{\int z dm}{M} \quad \dots \quad (9)$$

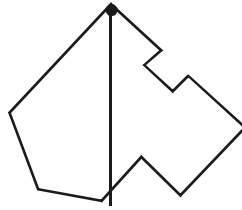
Sekarang kita bisa menganggap gerak sebuah benda tegar bermassa  $M$  sebagai gerak partikel bermassa  $M$ . Pusat massa benda bergerak seperti partikel, artinya tidak mengalami rotasi. Pusat massa sistem bergerak seolah-olah seluruh massa sistem dipusatkan pada titik pusat massa benda itu.

Apakah benda tegar itu? Benda tegar adalah benda yang saat bergerak jarak antartitiknya tidak berubah. Misalnya sepotong kayu padat. Jika misalnya kalian melempar suatu benda ke atas, lalu benda tadi berubah bentuk, maka benda itu bukan benda tegar. Kita akan mempelajari rotasi pada benda tegar.

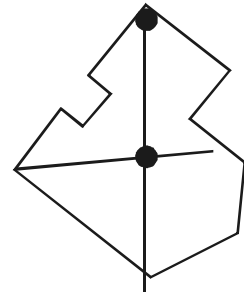
Sebuah benda tegar yang memiliki kerapatan sama di semua bagian benda, titik pusat massanya terletak di tengah-tengah benda itu. Misalnya pusat massa sebuah bola terletak di titik pusat bola dan di tengah-tengah bola. Kita bisa mencari pusat massa suatu benda dengan cara menggantung benda pada titik-titik yang berbeda. Misalkan benda kita berbentuk segitiga. Gantung segitiga pada titik sudut  $A$ , lalu buatlah garis vertikal dari  $A$ . Kemudian gantung pada titik  $B$ , lalu tarik garis vertikal. Garis vertikal pertama akan bertemu dengan garis vertikal yang kedua. Pusat massa benda terletak pada titik potong kedua garis vertikal tersebut. Kita bisa melakukan hal yang sama untuk benda-benda yang bentuk tidak beraturan.



**Langkah 1 :** Siapkan benda yang akan dicari pusat massanya.



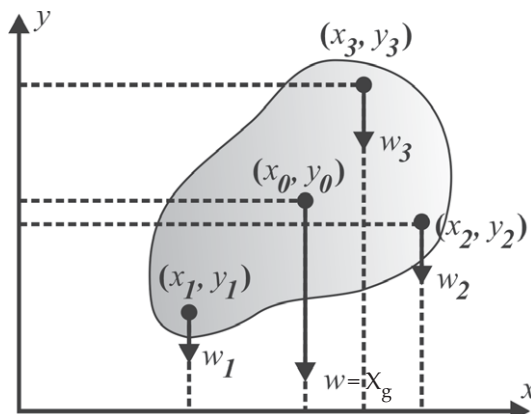
**Langkah 2 :** Gantung benda pada salah satu titik sudutnya. Tarik garis vertikal ke bawah dari ujung yang digantung.



**Langkah 3 :** Gantung benda pada titik sudut yang lain pada benda. Tarik garis vertikal ke bawah dari ujung yang digantung. Perpotongan dua garis tersebut adalah pusat massa benda.

Sumber : Penerbit

**Gambar 6.9** Menentukan pusat massa suatu benda



**Gambar 6.10** Titik berat (gambar diambil dari Tipler)

Selain titik pusat massa kita mengenal titik pusat berat. Samakah titik pusat massa dengan titik pusat berat? Titik pusat berat akan berimpit dengan titik pusat massa bila percepatan gravitasi pada semua titik pada benda itu sama. Mari kita lihat gambar di samping.

Tiap elemen massa  $dm$  akan memiliki berat  $W = gdm$ . Total gaya berat bisa kita anggap berpusat pada suatu titik  $X_G$ .  $X_G$  kita sebut sebagai titik berat

$$X_G w = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n w_n}{w} \quad \dots \quad (10)$$

Bila  $g$  yang bekerja pada tiap  $dm$  sama maka

$$X_G = \frac{x_1 dm_1 g + x_2 dm_2 g + \dots + x_n dm_n g}{dm_1 g + dm_2 g + \dots + dm_n g}$$

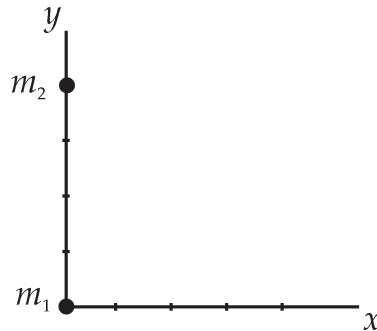
$$= \frac{\sum_{n=1}^N x_n dm_{n1} g}{Mg} = \frac{\sum x_n dm_n}{M} \quad \dots (11)$$

sehingga titik berat maka berimpit dengan titik pusat massa.



## Contoh Soal 2

- (a) Sebuah sistem terdiri atas dua massa masing-masing bermassa 3 kg. Massa 1 terletak di titik (0,0), masa kedua di titik (0,4) di manakah pusat massa benda?
- (b) Jika massa masing masing adalah 3 kg dan 5 kg, di manakah pusat massa sistem? Pusat massa akan bergeser mendekati benda yang bermassa lebih besar.



**Penyelesaian :**

a. 
$$x_{pm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2} \quad y_{pm} = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$x_{pm} = \frac{(0)(3) + (0)(3)}{3 + 3} = 0 \quad y_{pm} = \frac{(0)(3) + (4)(3)}{3 + 3} = 2$$

pusat massa terletak di tengah kedua benda tersebut atau berada pada (0; 2)

b. 
$$x_{pm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2} \quad y_{pm} = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$x_{pm} = \frac{(0)(3) + (0)(5)}{3 + 5} = 0$$

$$y_{pm} = \frac{(0)(3) + (4)(5)}{3 + 5} = 2,5$$

pusat massa berada pada titik (0; 2,5)

Tampak pusat massa bergeser mendekati massa yang lebih berat.

## C. Momen Inersia dan Tenaga Kinetik Rotasi

### 1. Sistem Diskrit

Tinjaulah sistem yang terdiri atas 2 benda. Benda  $A$  dan benda  $B$  dihubungkan dengan batang ringan yang tegar dengan sebuah batang tegak yang merupakan sumbu rotasi kedua benda. Kemudian kedua benda dirotasikan dengan kecepatan sudut yang sama sebesar  $\omega$ . Benda  $A$  berjarak  $r_1$  dari sumbu rotasi dan benda  $B$  berjarak  $r_2$  dari sumbu rotasinya. Kecepatan linear benda  $A$  adalah  $v_1$  dan kecepatan linear benda  $B$  adalah  $v_2$ . Berapakah tenaga kinetik kedua benda tersebut? Tenaga kinetik benda  $A$  adalah:

$$K_A = \frac{1}{2} m_A v_1^2 \quad \dots \quad (12)$$

Tenaga kinetik benda  $B$  adalah:

$$K_B = \frac{1}{2} m_B v_2^2 \quad \dots \quad (13)$$

Bila dinyatakan dengan kecepatan sudutnya dengan mengingat  $v = r\omega$  maka tenaga kinetik kedua benda tersebut adalah:

$$K_A = \frac{1}{2} m_A (r_A \omega)^2 = \frac{1}{2} m_A r_A^2 \omega^2$$
$$K_B = \frac{1}{2} m_B (r_B \omega)^2 = \frac{1}{2} m_B r_B^2 \omega^2 \quad \dots \quad (14)$$

Secara umum, persamaan (14) dapat juga kita tuliskan sebagai

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \dots \quad (15)$$

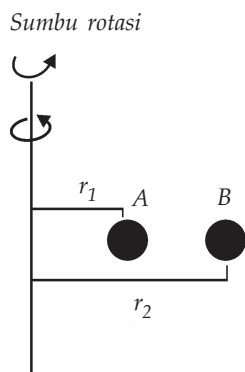
dengan momen inersia atau  $I$  sebagai

$$I = mr^2 \quad \dots \quad (16)$$

Perhatikan persamaan (16) dan persamaan (12), kedua persamaan tersebut merupakan tenaga kinetik rotasi suatu partikel. Momen inersia sama dengan massa pada gerakan translasi, demikian juga fungsinya. Kecepatan sudut kedua benda sama yaitu  $\omega$  tetapi besarnya tenaga kinetik rotasi berbeda disebabkan karena momen inersianya berbeda. Sama halnya dengan dua benda bergerak translasi dengan kecepatan sama, tenaga kinetiknya akan berbeda sebanding dengan massanya dan satuan momen inersia adalah  $\text{kg/m}^2$ .

Besar momen inersia bergantung pada massanya dan juga jaraknya dari sumbu rotasi. Semakin jauh dari sumbu rotasi maka momen inersianya akan semakin besar. Pada benda B benda di atas manakah yang memiliki momen inersia yang lebih besar? Kedua benda bermassa sama, tetapi  $r_2 > r_1$  sehingga momen inersia benda B lebih besar daripada benda A. Dengan demikian, kita bisa melihat bahwa momen inersia menunjukkan sebaran massanya. Semakin besar jaraknya yang berarti semakin tersebar, maka momen inersianya semakin besar.

Untuk sistem dengan dua benda seperti pada gambar maka momen inersia sistem adalah  $I_A + I_B$ . Bila suatu sistem terdiri atas banyak partikel maka momen inersia totalnya merupakan jumlah momen inersia masing-masing partikel.



$$I = \sum m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots \quad \dots \quad (17)$$

Pada sistem dua benda di atas momen inersia totalnya adalah:

$$I = m r_1^2 + m r_2^2$$

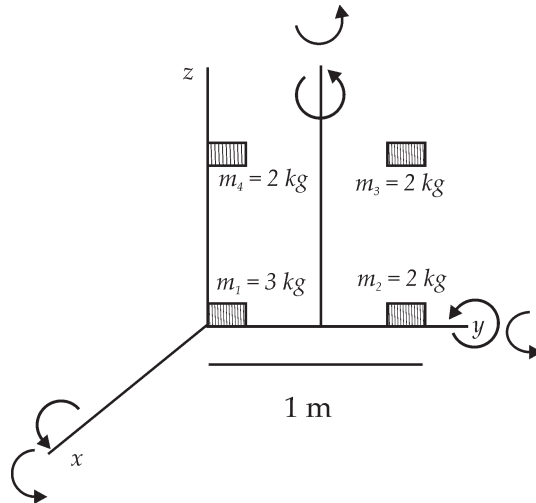
**Gambar 6.11** Benda A dan B yang sedang berotasi

Gambar (6.11) benda A berjarak  $r_1$  dari sumbu dan B berjarak  $r_2$  dari sumbu rotasi. Kedua benda massanya sama, momen inersia benda B lebih besar daripada momen inersia benda kedua. Momen inersia total adalah jumlah antara momen inersia A dan B.



### Contoh Soal 3

Carilah momen inersia sistem dua benda seperti pada gambar di bawah bila diputar terhadap:



- sumbu  $x$ , c sumbu  $x$  sebagai sumbu rotasi
- sumbu  $y$ .
- sumbu yang sejajar sumbu  $z$ , berjarak 0,5 m dari sumbu  $z$

Gambar di atas merupakan sistem dengan 4 buah massa, dirotasikan terhadap sumbu  $x, y$  dan sumbu sejajar sumbu  $z$  berjarak 0,5 m dari sumbu  $z$ .

#### Penyelesaian :

- momen inersia sistem terhadap sumbu  $x$   
 $r_1$  adalah jarak dari  $m_1$  ke sumbu  $x$ ,  $r_1 = 0$   
 $r_2$  adalah jarak dari  $m_2$  ke sumbu  $x$ ,  $r_1 = 1$  m  
 $r_3 = 2$  m dan  $r_4 = 0$  m  

$$I = m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2$$

$$I = (3)(0)^2 + (2)(1)^2 + (3)(1)^2 + (2)(0)^2 = 5 \text{ kgm}^2$$
- momen inersia terhadap sumbu  $y$   
 $r_1$  adalah jarak dari  $m_1$  ke sumbu  $y$ ,  $r_1 = 0$  m  
 $r_2$  adalah jarak dari  $m_2$  ke sumbu  $y$ ,  $r_1 = 0$  m

$$r_3 = 1 \text{ m dan } r_4 = 1 \text{ m}$$

$$I = m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2$$

$$I = (3)(0)^2 + (2)(0)^2 + (3)(1)^2 + (2)(1)^2 = 5 \text{ kgm}^2$$

- c. momen inersia terhadap sumbu yang sejajar sumbu  $z$  berjarak 0,5 m dari sumbu  $z$  seperti pada gambar.

$$r_1 \text{ adalah jarak dari } m_1 \text{ ke sumbu rotasi, } r_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$r_2 \text{ adalah jarak dari } m_2 \text{ ke sumbu } y, r_1 = 0,5 \text{ m}$$

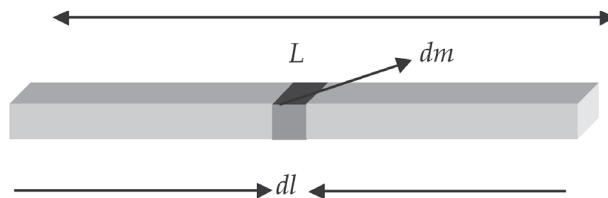
$$r_3 = 0,5 \text{ m dan } r_4 = 0,5 \text{ m}$$

$$I = m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2$$

$$I = (3)(0,5)^2 + (2)(0,5)^2 + (3)(0,5)^2 + (2)(0,5)^2 \\ = 2,5 \text{ kgm}^2$$

## 2. Sistem Kontinu

Sekarang kita akan mencari momen inersia untuk sistem dengan distribusi massa kontinu. Mari kita tinjau sebuah benda tegar misalnya sebuah batang bermassa total  $M$ . Batang tadi sebenarnya terdiri atas partikel bermassa kecil-kecil yang bila dijumlahkan semuanya berjumlah  $M$ , sehingga momen inersia batang adalah jumlah dari seluruh momen inersia partikel bermassa.



**Gambar 6.12** Batang bermassa  $M$  dibagi menjadi elemen kecil-kecil bermassa  $dm$  dengan panjang  $dl$ .

Kita bisa membagi batang di atas menjadi  $n$  buah elemen  $dl$ . Setiap panjang  $dl$  bermassa sebesar  $dm$ . Total massa adalah  $\sum dm = M$ . Batang tadi memiliki kerapatan yang homogen, artinya kerapatan di setiap titik adalah sama. Misalnya kerapatan kita beri simbol  $\lambda$  besarnya kerapatan adalah massa total dibagi dengan panjangnya, yaitu sebesar



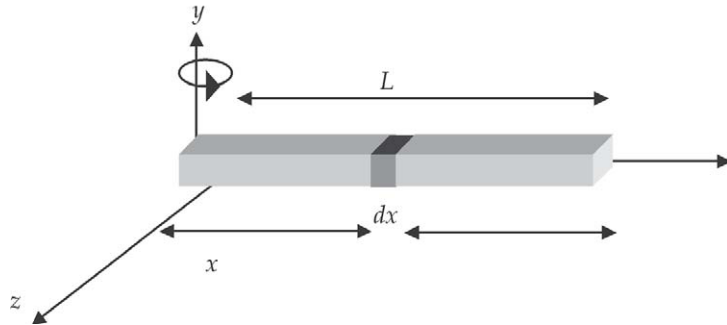
$$\lambda = \frac{M}{L} \quad \dots \quad (18)$$

maka bisa mencari besarnya  $dm$  sebagai

$$dm = \lambda dl = \frac{m}{l} dl \quad \dots \quad (19)$$

Satuan kerapatan pada masalah ini adalah satuan massa persatuan panjang atau kg/m.

Berapakah momen inersia batang bila diputar dengan sumbu rotasi terletak di ujung batang? Mari kita lihat Gambar (6.13).



**Gambar 6.13** Batang diputar terhadap sumbu yang melewati ujung batang

Besarnya momen inersia adalah tiap elemen  $dm$  adalah:

$$I = \sum r^2 dm \quad \dots \quad (20)$$

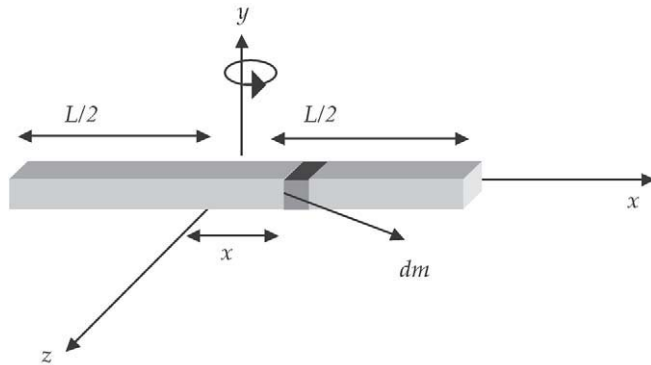
karena sistemnya kontinu tanda  $\sum$  kita ganti dengan integral dan  $m$  kita ganti dengan  $dm$  sehingga kita dapatkan:

$$I = \int_0^L r^2 dm \quad \dots \quad (21)$$

Nilai  $r$  bervariasi yaitu mulai dari 0 atau  $r$  di ujung batang di posisi  $x=0$  sampai  $L$  atau nilai  $r$  di ujung yang lainnya. Dengan menggunakan  $dm$  pada persamaan (19) dan mengingat  $dl = dx$  karena batang terletak pada sumbu  $x$  maka:

$$I = \int_0^L x^2 \frac{M}{L} dx = \frac{M}{L} \int_0^L x^2 dx$$

$$I = \frac{M}{L} \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^L = \frac{M}{L} \left[ \frac{L^3}{3} - \frac{0^3}{3} \right] = \frac{ML^2}{3} \quad \dots \quad (22)$$



**Gambar 6.14** Batang dirotasikan terhadap sumbu yang tegak lurus batang yang berada di tengah batang

Bagaimana kalau kita menggeser sumbu rotasi sehingga sumbu rotasi melewati bagian tengah batang seperti pada gambar (6.14)? Kita masih menggunakan persamaan yang sama. Batas untuk  $dx$  bukan dari 0 sampai  $L$  tetapi dari  $-\frac{L}{2}$  sampai  $+\frac{L}{2}$ , sehingga momen inersia batang adalah:


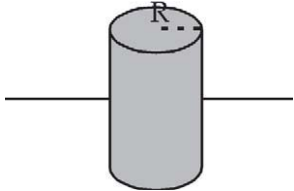

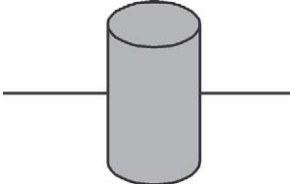

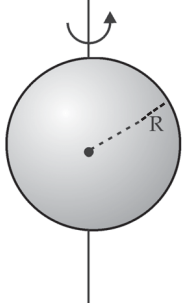
$$I = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 \frac{M}{L} dx = \frac{M}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 dx$$

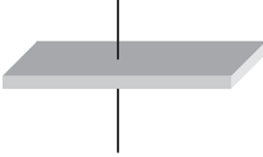
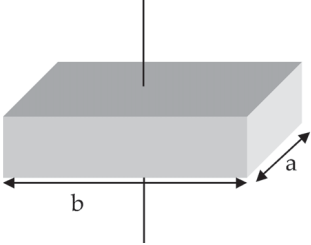
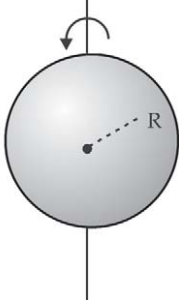
$$I = \frac{M}{L} \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = \frac{M}{L} \left[ \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3} - \frac{\left(-\frac{L}{2}\right)^3}{3} \right]$$

$$I = \frac{M}{3L} \left[ \frac{L^3}{8} - \frac{-L^3}{8} \right] = \frac{ML^2}{12} \quad \dots \quad (23)$$

Tampak bahwa momen inersia batang akan berbeda jika sumbu rotasinya berbeda. Momen inersia untuk berbagai bentuk benda tegar dapat dilihat pada tabel momen inersia.

**Tabel 6.1 Momen Inersia untuk Berbagai Benda pada Berbagai Sumbu Rotasi**

<p>Kulit silinder terhadap sumbu yang lewat pusat silinder.</p> $I = MR^2$ 	<p>Kulit silinder yang panjangnya <math>L</math> terhadap diameter yang lewat pusat.</p> $I = \frac{1}{2} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$ 	<p>Silinder pejal terhadap sumbu.</p> $I = \frac{1}{2} MR^2$ 
<p>Silinder pejal berjari-jari <math>R</math>, panjangnya <math>L</math> terhadap diameter yang melalui pusat.</p> $I = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$ 	<p>Batang tipis terhadap garis tegak lurus melalui salah satu ujungnya.</p> $I = \frac{1}{3} ML^2$ 	<p>Kulit bola tipis berjari-jari <math>R</math> terhadap diameter-nya.</p> $I = \frac{2}{3} MR^2$ 

<p>Batang tipis terhadap garis tegak lurus yang melalui pusat.</p> $I = \frac{1}{12} MR^2$ 	<p>Balok padat terhadap sumbu yang melalui pusat tegak lurus pada permukaan.</p> $I = \frac{M}{12} (a^2 + b^2)$ 	<p>Bola pejal berjari-jari <math>R</math> terhadap diameternya.</p> $I = \frac{2}{5} MR^2$ 
--	---	---

## D. Hukum Newton II untuk Rotasi

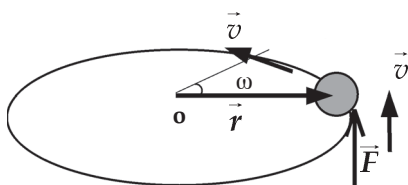


Sumber : Penerbit

**Gambar 6.15** Daun pintu diberi gaya yang besarnya sama di ujung pintu dan di tengah pintu akan memberikan percepatan sudut yang berbeda, karena torsi kedua gaya berbeda

Kalian tentu masih ingat bahwa sebuah benda bermassa  $m$  yang mula-mula diam akan bergerak bila dikenai gaya  $\vec{F}$  dengan percepatan sebesar  $\vec{a}$ . Pada pelajaran yang lalu juga dipaparkan bahwa sebuah benda yang dikenai torsi, maka benda akan berotasi. Bila sebuah benda berotasi tentunya dia memiliki kecepatan sudut dan mungkin juga percepatan sudut. Adakah kaitan antara percepatan sudut dengan torsi seperti antara  $\vec{a}$  dengan  $\vec{F}$  pada gerak linear?

Coba perhatikan sebuah daun pintu yang tidak terkunci. Doronglah tepi daun pintu dengan gaya tertentu, catatlah dalam pikiran kalian berapa kira-kira percepatan sudut pintu. Ulangi mendorong pintu di tengah antara tepi pintu dan engsel yang merupakan sumbu rotasi. Doronglah dengan gaya yang sama. Meskipun gaya dengan torsinya akan berbeda. Perkirakanlah percepatan sudutnya. Bandingkanlah



**Gambar 6.16** Bila  $\vec{F}$  diberikan terus-menerus, maka benda akan berotasi terus-menerus.

percepatan sudut kedua percobaan tadi, mana yang lebih besar?

Mari kita menurunkan persamaan yang menghubungkan antara torsi dan percepatan sudut. Tinjau sebuah benda bermassa  $m$  terikat oleh kawat tipis yang kaku berada sejauh  $r$  dari titik  $O$ . Benda kemudian diberi gaya  $\vec{F}$  yang tegak lurus

dengan  $\vec{r}$  (Gambar 6.16).

Benda akan melakukan gerak rotasi, dengan arah lintasan sama dengan arah  $\vec{F}$  dan mengalami percepatan linear  $\vec{a}$  dengan memenuhi persamaan:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \dots \quad (24)$$

Lintasan benda akan melingkar, percepatan setiap saat memiliki arah sejajar dengan lintasan setiap saat. Supaya menjadi torsi kita kalikan persamaan di atas dengan  $r$  pada kedua ruasnya, sehingga kita peroleh :

$$rF = mra \quad \dots \quad (25)$$

Percepatan tangensial benda sama dengan  $r$  dikalikan percepatan sudutnya atau  $a = r\alpha$ , sehingga persamaan (25) bisa kita tuliskan :

$$rF = mr^2\alpha$$

Karena  $F$  tegak lurus vektor  $r$  maka  $rF$  bisa dikatakan sebagai torsi yang dialami benda sehingga kita mendapat persamaan:

$$\tau = I\alpha \quad \dots \quad (26)$$

Persamaan (26) di atas adalah hukum Newton kedua untuk rotasi. Bila  $F$  menghasilkan percepatan linear maka  $t$  menghasilkan percepatan sudut pada benda. Kalian sudah mendapatkan  $I$  adalah momen inersia, bandingkan persamaan (26 dan 24) di atas. Tampak  $I$  sama dengan massa. Massa menunjukkan kelembaman benda untuk bergerak, begitu juga momen inersia menunjukkan kelembaman benda untuk berotasi. Semakin besar momen inersia suatu benda, maka

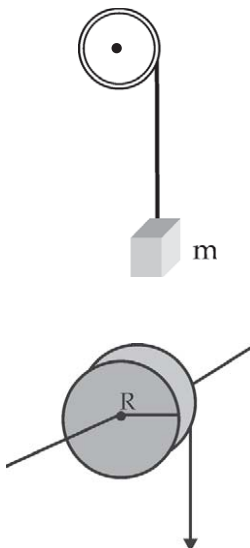
diperlukan torsi yang semakin besar untuk menggerakkannya agar berotasi.

Bagaimana jika benda yang berotasi tidak hanya sebuah titik, tetapi sebuah benda tegar, misalnya cakram berjari-jari  $r$  yang diputar pada sumbunya. Silinder terdiri atas banyak partikel. Misalkan torsi yang bekerja pada titik ke  $i$  adalah  $\tau_i$ . Tiap titik bermassa  $m_i$  dan jaraknya dari sumbu rotasi adalah  $r_i$ . Tiap titik memiliki percepatan sudut yang sama, tetapi percepatan linear tiap titik berbeda tergantung pada jarak titik tersebut dengan sumbu rotasi. Maka total torsi yang bekerja pada silinder adalah:

$$\begin{aligned}\sum_i \tau_i &= \sum_i m_i r_i^2 \alpha_i \\ \tau &= \left( \sum_i m_i r_i^2 \right) \alpha = I \alpha\end{aligned}$$



#### Contoh Soal 4



Sebuah tali dililitkan pada katrol berjari-jari 5 cm. Massa katrol 0,5 kg. Ujung tali diberi beban bermassa 2 kg. Berapa besar lengan torsi dan torsi yang dikerjakan oleh tali? Berapa percepatan benda?

**Penyelesaian :**

Katrol adalah cakram atau silinder tipis maka momen inersia katrol adalah :

$$I = \frac{1}{2} MR^2 = \frac{1}{2} (0,5)(0,05)^2 = 0,0625 \text{ kg m}^2$$

Katrol akan berputar dengan sumbu putaran tegak lurus katrol dan melalui pusat massa katrol.

Lengan torsi adalah jari-jari = 5 cm = 0,05 m.

$$F = w_{\text{beban}} = (2 \text{ kg})(9,8 \text{ m/det}^2) = 19,6 \text{ N}$$

$$\tau = lF = rF = (0,05)(19,6) = 0,98 \text{ Nm}$$

$$\tau = I\alpha$$

$$0,98 = (0,0625)\alpha,$$

$$\alpha = 15,68 \text{ rad/det}^2.$$

**Perhatikan:**

Satuan percepatan sudut dalam SI adalah radian/det<sup>2</sup>.

Kalian tidak dapat mencari percepatan sudut dengan cara:

$$F = ma$$

dengan  $F$  adalah berat beban, sehingga  $a = (mg)/m$ ,  $g = (9,8)$  dan

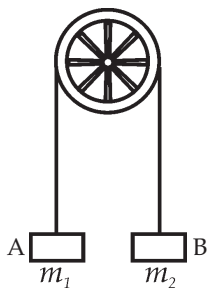
$$\alpha = \frac{a}{R} = \frac{9,8}{0,05} = 196 \text{ rad/det}^2.$$

Percepatan yang terjadi pada contoh adalah percepatan beban bila tanpa katrol. Bila digantung pada katrol maka percepatan beban akan lebih kecil.

Percepatan sudut akan terjadi atau katrol akan berputar jika berat beban dapat memutar katrol, dengan demikian tergantung pada momen inersia katrol.



### Contoh Soal 5



Sebuah mesin *atwod* ditunjukkan pada gambar di samping. Massa benda  $A$  adalah 2 kg, massa benda  $B = 4$  kg. Massa katrol = 1 kg. Berapa percepatan tiap benda?

**Penyelesaian :**

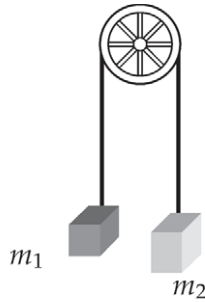
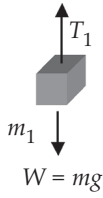
Mari kita lihat pada tiap-tiap benda.

Pada benda 1:

$$\begin{aligned} \sum F &= m_1 a_1 \\ T_1 - m_1 g &= m_1 a_1 \quad \dots \quad (a) \end{aligned}$$

Pada benda 2:

$$\begin{aligned} \sum F &= m_2 a_2 \\ m_2 g - T_2 &= m_2 a_2 \quad \dots \quad (b) \end{aligned}$$



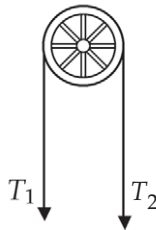
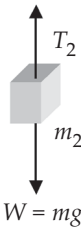
Pada katrol

$$\sum \tau = I\alpha$$

$$\tau_2 - \tau_1 = I\alpha$$

$$rT_2 - rT_1 = I\alpha$$

$$r(T_2 - T_1) = I\alpha \quad \dots \quad (c)$$



Percepatan benda satu sama dengan percepatan benda dua atau  $a_1 = a_2$ , sehingga:

Persamaan (b) ditambah persamaan (a) menghasilkan:

$$T_1 - T_2 + (m_2 - m_1)g = (m_1 + m_2)\alpha \quad \dots \quad (d)$$

Persamaan (d) digabungkan dengan persamaan (c) menghasilkan :

$$-\frac{I\alpha}{r} + (m_2 - m_1)g = (m_1 + m_2)a$$

mengingat  $\alpha = \frac{a}{r}$

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{\frac{I}{r^2} + (m_1 + m_2)}$$

dengan memasukkan  $I$  untuk silinder tipis yaitu  $I = Mr^2$  maka

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{\frac{M}{2}(m_2 + m_1)}$$

jadi percepatan massa 2 = massa 1 yaitu:

$$\begin{aligned} a &= \frac{(4 - 2)(9,8)}{\frac{1}{2} + (4 + 2)} \\ &= \frac{19,6}{6,5} \\ &= 3 \text{ m/det}^2 \end{aligned}$$



Dari contoh 4 di atas, tegangan tali  $T_1$  tidak sama besarnya dengan  $T_2$ . Besar  $T_1$  dan  $T_2$  dapat dicari dari persamaan (a) dan (b). Bila katrol bukan silinder tipis tapi misalnya silinder berongga, maka kita gunakan momen inersia untuk silinder berongga.



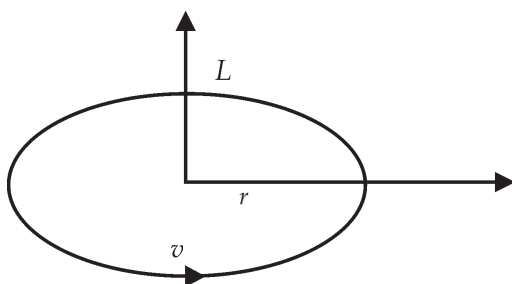
### Wawasan Produktivitas : Daya Saing

Sekarang banyak teknologi canggih bermunculan dari negara-negara maju. Nah, setelah kalian mempelajari hukum Newton II untuk rotasi, apa yang kalian pikirkan untuk mengejar ketinggalan teknologi kita? Berkonsultasilah kepada guru kalian!

## E. Momentum Sudut

Kita sudah mendapatkan bahwa hukum Newton II untuk benda berotasi sama dengan Hukum Newton untuk gerak translasi. Bagaimana dengan momentumnya? Pada gerak transisi kita mengenal momentum linear dan hukum kekekalan momentum linear. Momentum sudut linear akan kekal bila total gaya yang bekerja pada sistem adalah nol. Bagaimana pada gerak rotasi? Pada gerak rotasi kita akan menemukan apa yang disebut sebagai mometum sudut.

Mari kita tinjau lagi gerak benda yang berotasi di atas (Gambar 6.16). Benda akan memiliki momentum linear sebesar  $mv$ . Momentum sudut didefinisikan sebagai hasil perkalian silang antara vektor  $r$  dan momentum linearnya.



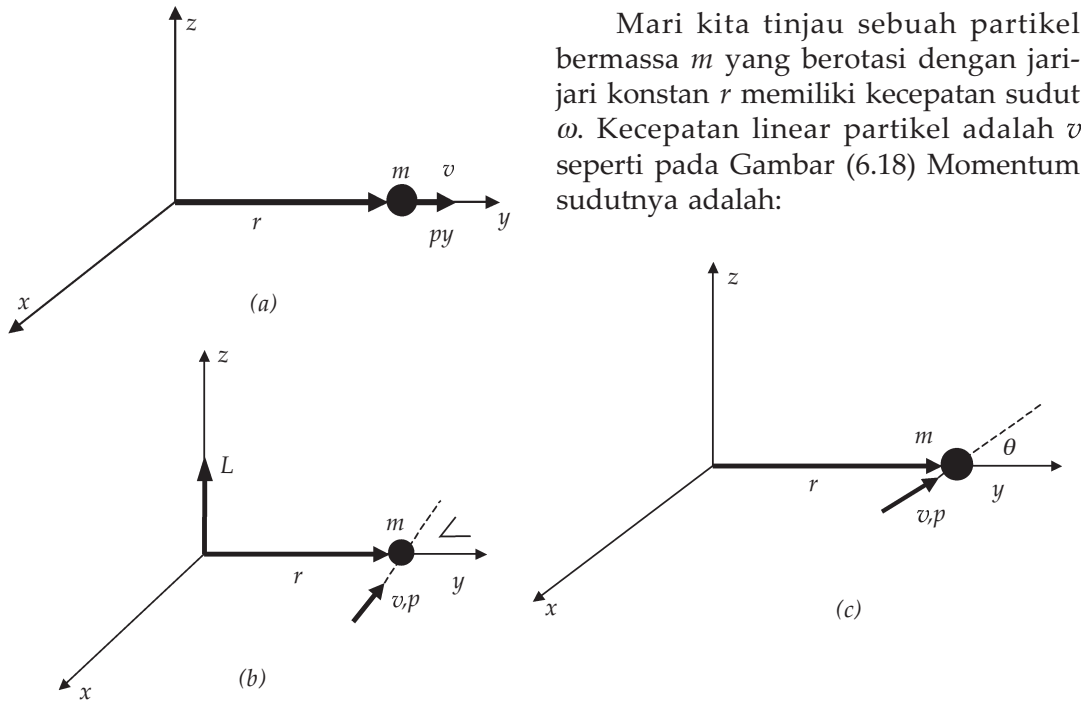
**Gambar 6.17** Arah putaran jari-jari adalah arah  $v$  dan arah ibu jari adalah arah momentu sudut  $L$ .

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad \dots (27)$$

Arah momentum sudut  $L$  tegak lurus dengan arah  $r$  dan arah  $v$ . Arah momentum sudut sesuai dengan arah putaran sekrup tangan kanan yang ditunjukkan Gambar (6.17). Besar momentum sudut adalah:

$$L = (r \sin \theta) mv \quad \dots (28)$$

Bila vektor  $\vec{r}$  dan  $\vec{v}$  saling sejajar maka momentum sudut benda adalah nol. Bila antara vektor  $\vec{r}$  dan  $\vec{v}$  saling tegak lurus maka besar momentum sudut adalah  $rmv$ . Seandainya antara  $\vec{r}$  dan  $\vec{p}$  membentuk sudut sembarang maka besar momentum sudut antara nol dan  $rmv$ , tergantung pada besar sudutnya. Kita bisa melihatnya pada gambar (6.17).



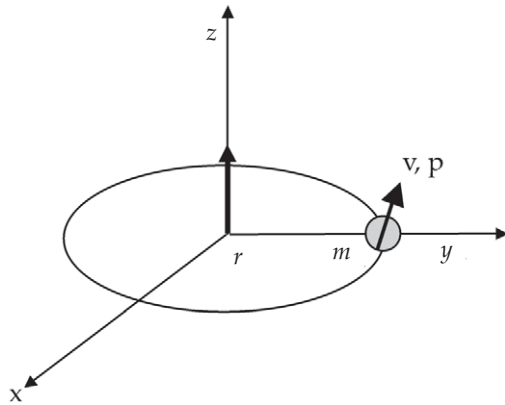
**Gambar 6.18** Jika  $r$  sejajar  $p$  maka  $L=0$ , (b) jika  $r$  tegak lurus  $p$  maka nilai  $L$  maksimal  $= rmv$ , (c) jika antara  $r$  dan  $v$  membentuk sudut  $\theta$  maka  $L=rmv \sin \theta$

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} = mr^2\omega \hat{k} \quad \dots \quad (29)$$

Arah momentum sudutnya ke arah sumbu  $z$  positif. Besarnya momentum sudut adalah:

$$L = rmv = rm(r\omega) = I\omega \quad \dots \quad (30)$$

Tampak bahwa momentum sudut analog dengan momentum linear pada gerak rotasi, kecepatan linear sama dengan kecepatan rotasi, massa sama dengan momen inersia.



**Gambar 6.19** Arah putaran partikel berlawanan dengan arah gerak jarum jam, arah momentum sudut ke sumbu z positif

Pada gerak translasi kita mengetahui bahwa gaya merupakan turunan momentum linear terhadap waktu dan dapat ditulis:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Bagaimana kalau kita menurunkan momentum sudut  $L$  terhadap waktu?

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(\vec{r} \times m\vec{v})}{dt} = m \frac{d(\vec{r} \times \vec{v})}{dt}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = m \left( \vec{r} \times \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{v} \right)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = m(\vec{r} \times \vec{a} + \vec{v} \times \vec{v})$$

Suku kedua adalah nol karena  $\vec{v}$  sejajar dengan dirinya sendiri sehingga perkalian silangnya adalah nol. Sekarang kita mendapatkan:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = (\vec{r} \times m\vec{a}) = \vec{r} \times \vec{F} \quad \dots \quad (31)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau} \quad \dots \quad (32)$$

Persamaan (32) menunjukkan kepada kita torsi analog dengan gaya pada gerak linear.

## F. Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Dalam gerak linear kita telah mempelajari apabila tidak ada gaya dari luar sistem maka momentum sudut total sistem adalah kekal, atau tidak berubah. Dari Persamaan (32) tampak jika torsi pada suatu sistem adalah nol maka  $dL = 0$  atau perubahan momentum sudutnya nol, atau momentum sudutnya kekal. Apabila  $\tau = 0$  maka  $L$  konstan, merupakan hukum kekekalan momentum.



## Contoh Soal 6

Seorang penari balet berputar dengan kecepatan sudut  $\omega$ , momen inersianya  $I_m$ . Bila dia kemudian merentangkan kedua tangannya sehingga momen inersianya menjadi  $I_a$ , berapa kecepatan sudut penari sekarang? Kita bisa menyelesaikan dengan menggunakan hukum kekekalan momentum sudut. Pada penari tidak ada gaya dari luar maka tidak ada torsi dari luar, sehingga momentum sudut kekal:

$$\begin{aligned} L_m &= L_a \\ I_m \omega_m &= I_a \omega_a \end{aligned}$$

Penari merentangkan kedua tangannya maka momen inersianya menjadi bertambah.  $I_a > I_m$  maka kecepatan sudut penari menjadi berkurang.

$$\omega_a = \frac{I_m \omega_m}{I_a}$$

Begitu juga bila penari balet mula-mula tangannya terentang, kemudian dia merapatkan kedua tangannya. Momen inersia penari akan mengecil sehingga kecepatan sudutnya menjadi lebih besar. Kecepatan sudut bisa berubah meskipun tidak ada torsi dari luar. Tenaga kinetik rotasi penari juga tidak konstan.



Sumber : Penerbit

**Gambar 6.20** Peloncat indah

Prinsip ini juga dipakai pada peloncat indah. Saat peloncat meninggalkan papan memiliki laju sudut  $\omega_o$  terhadap sumbu horizontal yang melalui pusat massanya, sehingga dia dapat memutar sebagian tubuhnya setengah lingkaran. Jika ia ingin membuat putaran 3 kali setengah putaran, maka ia harus mempercepat laju sudut sehingga menjadi 3 kali kelajuan sudut semula. Gaya yang bekerja pada peloncat berasal dari gravitasi, tetapi gaya gravitasi tidak menyumbang torsi terhadap pusat massanya, maka berlaku kekekalan momentum sudut. Agar laju sudutnya bertambah maka dia harus memperkecil momen inersia menjadi  $1/3$  momen inersia mula-mula dengan cara menekuk tangan dan kakinya ke arah pusat tubuhnya.

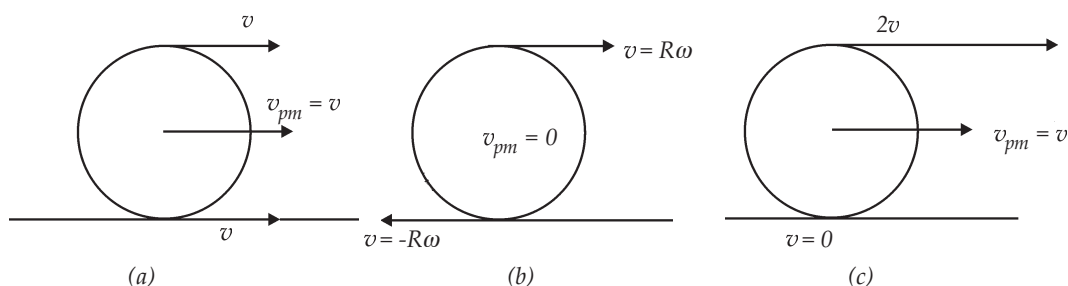


## Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Carilah artikel di media cetak atau elektronik yang membahas tentang penerapan hukum kekekalan momentum sudut. Apakah penerapan hukum tersebut sudah maksimum? Kupaslah dan hasilnya diserahkan kepada guru kalian.

## G. Gabungan antara Gerak Translasi dan Rotasi

Mari kita tinjau sebuah silinder yang kita beri gaya pada tepinya, apa yang terjadi? Silinder akan berotasi dan juga bertranslasi. Sebelumnya mari kita lihat kapan suatu benda dikatakan melakukan gerak translasi murni dan kapan melakukan gerak rotasi murni. Ambillah sebuah silinder, berilah gaya pada tepi silinder sehingga silinder berputar dengan sumbu rotasi di tengah-tengah silinder. Sedang pada gerak translasi murni misalkan sebuah silinder ditarik tanpa berotasi, sehingga yang ada hanya gerak translasi saja.



Gambar 6.21 (a) translasi murni, (b) rotasi murni dan (c) gabungan

Bagaimana dengan kecepatannya? Benda yang melakukan gerak translasi murni maka semua titik bergerak dengan kecepatan yang sama. Lihat gambar (6.21a). Kecepatan di titik A sama dengan kecepatan di titik P sama dengan kecepatan di titik B. Sedang pada gerak rotasi murni titik-titik yang berseberangan akan bergerak dengan kecepatan linear yang berlawanan. Kecepatan di titik A berlawanan dengan kecepatan di titik B, kecepatan di titik P adalah 0, sedang kecepatan sudut di titik A sama dengan di titik B. Pada gerak gabungan kecepatan diperoleh dengan menjumlahkan vektor-vektor kecepatannya. Kecepatan di titik A adalah  $2v$ , kecepatan di titik P adalah  $v$  dan kecepatan di titik B adalah 0.

Gerak gabungan antara gerak translasi dan gerak rotasi disebut sebagai *mengelinding*. Di bagian depan kita meninjau sebuah partikel yang bergerak berotasi memiliki tenaga kinetik sebesar  $K = I\omega^2$ . Bila yang berotasi adalah benda tegar maka kita gunakan momen inersia benda yang bersangkutan. Untuk benda yang menggelinding maka tenaga kinetiknya adalah hasil penjumlahan antara tenaga kinetik translasi dan tenaga kinetik rotasi.

$$K = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2$$



### Contoh Soal 7

Silinder padat memiliki massa 1,5 kg dan jari-jarinya 8,5 cm, menggelinding pada lantai dengan kecepatan 15 cm/detik.

- Berapakah kecepatan di bagian atas silinder?
- Berapa kecepatan sudut silinder?
- Berapakah tenaga kinetik rotasi silinder?

**Penyelesaian :**

*Diketahui* : massa silinder  $M = 1,5$  kg  
jari-jari  $R = 8,5$  cm  
laju silinder  $v = 15$  cm/det

*Ditanyakan* : a.  $v_{puncak} = ?$   
b.  $\omega = ?$   
c.  $K = ?$

*Jawab* :

- Kecepatan sudut di puncak silinder:

$$\begin{aligned} v_{puncak} &= 2 v_{pm} \\ &= 2 \cdot 15 \text{ cm/det} \\ &= 30 \text{ cm/det} \end{aligned}$$

- Kelajuan sudut silinder:

$$\omega = \frac{v_{pm}}{R} = \frac{15}{8,5} = 1,8 \text{ rad/det}$$

- Tenaga kinetik silinder:

$$K = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} M v_{pm}^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} M R^2 \right) \left( \frac{v_{pm}}{R} \right)^2 \\
&= \frac{3}{4} M v_{pm}^2 \\
&= \frac{3}{4} (1,5) (0,15)^2 \\
&= 0,024 \text{ J}
\end{aligned}$$



### Contoh Soal 8

Sebuah bola bowling memiliki jari-jari 10 cm, dan massanya 7 kg mula-mula dia di puncak bidang miring kemudian menggelinding menuruni papan yang terletak miring dengan sudut kemiringan  $34^\circ$ . Panjang papan 2 m. Berapakah kecepatan bola saat sampai di bawah?

**Penyelesaian :**

Bola menggelinding sejauh  $L$  atau ketinggian  $L \sin 34^\circ$ . Energi yang dimiliki bola bowling pada keadaan awal adalah energi potensial gravitasi saja karena benda mula-mula diam. Setelah menggelinding sampai di bawah energi potensial bola menjadi nol dan seluruh tenaganya menjadi energi kinetik. Dengan menggunakan hukum kekekalan tenaga mekanik maka:

$$Mgh = \frac{1}{2} M v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

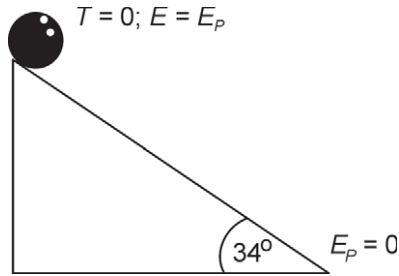
$$MgL \sin 34 = \frac{1}{2} M v_{pm}^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$MgL \sin 34 = \frac{1}{2} M v_{pm}^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} M R^2 \right) \left( \frac{v_{pm}}{R} \right)^2$$

Kita dapat menghitung kelajuan bola sebagai

$$v_{pm} = \sqrt{\left(\frac{10}{7}\right)gL \sin \theta}$$

$$\begin{aligned} v_{pm} &= \sqrt{\left(\frac{10}{7}\right)(9,8)(2) \sin 34} \\ &= 4 \text{ m/det} \end{aligned}$$



### Contoh Soal 9

Sebuah kulit silinder, sebuah silinder padat, dan sebuah bola padat yang bermassa dan berjari-jari sama yaitu  $R$  menggelinding pada papan seperti contoh soal di atas.

- Manakah yang mencapai tanah paling awal?
- Berapa kelajuan tiap benda?

**Penyelesaian :**

- Berdasarkan rumus tenaga kinetik untuk benda menggelinding, benda yang memiliki momen inersia besar akan memiliki tenaga kinetik rotasi yang semakin besar. Ketiga benda tersebut menurun bidang miring maka saat di bawah tenaga kinetik total yang dimiliki ketiga benda sama yaitu sebesar tenaga potensial saat di puncak bidang miring. Tenaga kinetik rotasi bola paling kecil maka tenaga kinetik translasi bola paling besar sehingga akan sampai di bawah lebih dulu kemudian diikuti silinder padat, dan kemudian kulit silinder.
- Persamaan tenaga untuk ketiga benda adalah:

$$Mgh = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2$$

$$Mgh = \frac{1}{2} Mv_{pm}^2 + \frac{1}{2} I \left( \frac{v_{pm}}{R} \right)^2$$



$$Mgh = \frac{1}{2} Mv_{pm}^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{I_{pm}}{R^2} \right) v_{pm}^2$$

$$v_{pm} = \sqrt{\frac{2gL \sin \theta}{1 + \frac{I_{pm}}{MR^2}}}$$

Tampak jika momen inersia benda besar maka kecepatan linear benda saat di bawah akan semakin kecil. Momen inersia bola adalah  $\frac{2}{5} MR^2$ , momen inersia silinder  $= \frac{1}{2} MR^2$ , dan momen inersia kulit silinder adalah  $MR^2$ . Kelajuan bola saat di bawah paling besar dan kelajuan kulit silinder paling kecil.

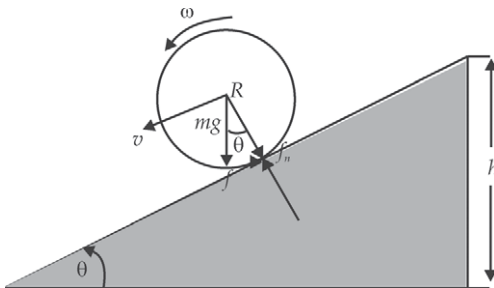


### Contoh Soal 10

Sebuah silinder padat bermassa  $M$  dan berjari-jari  $R$  menggelinding pada sebuah bidang miring dengan sudut kemiringan  $\theta$ . Berapa percepatan silinder?

**Penyelesaian :**

Perhatikan gambar! Agar silinder menggelinding tanpa selip digunakan gesekan statis.



Saat benda dipercepat menuruni bidang miring, kecepatan sudut harus bertambah agar benda menggelinding tanpa selip. Pertambahan kecepatan sudut disebabkan torsi yang dikerjakan gaya gesekan, dengan kata lain torsi menyebabkan terjadinya percepatan sudut sehingga dapat kita tuliskan:

$$\tau = I\alpha$$

Torsi ditimbulkan oleh gaya gesek kinetis, dan silinder berotasi terhadap sumbu yang melalui pusat massa. Pusat massa silinder, gaya gravitasi, dan gaya normal tidak menimbulkan torsi karena keduanya bekerja melalui pusat massa sehingga torsi  $\tau = 0$ .

$$fR = I_{pm}\alpha \quad \dots (a)$$

Kita tinjau gerak translasi silinder, komponen gaya gravitasi dan gaya gesek menimbulkan pusat massa silinder mengalami percepatan  $a_{pm}$  sebagai

$$mg \sin \theta - f = ma_{pm} \quad \dots (b)$$

Dengan memasukkan persamaan (a) ke persamaan (b) kita dapatkan :

$$mg \sin \theta - \frac{I_{pm}\alpha}{R} = ma_{pm}$$

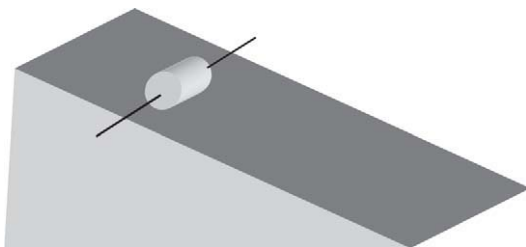
$$mg \sin \theta - \frac{I_{pm} a_{pm}}{R^2} = ma_{pm}$$

$$a_{pm} = \frac{mg \sin \theta}{\frac{I_{pm}}{R^2} + m}$$

Dengan menggunakan momen inersia silinder yang berotasi dengan sumbu sejajar panjang silinder dan lewat pusat massa adalah  $I = \frac{1}{2} MR^2$  kita dapatkan :

$$a_{pm} = \frac{mg \sin \theta}{\frac{1}{2} + m}$$

### Soal Latihan



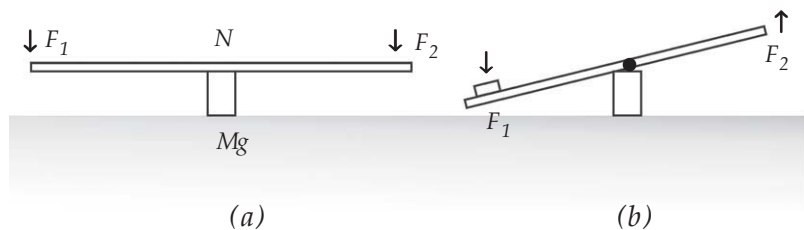
Soal seperti contoh 10, dengan mengganti silinder dengan bola, kulit bola, kulit silinder, dan silinder berongga. Benda apa yang paling dulu sampai di bawah? (benda yang memiliki percepatan pusat massa terbesar)

## H. Kestimbangan

Mari kita lihat benda yang bergerak dengan kecepatan konstan dan berotasi dengan kecepatan sudut konstan. Benda yang bergerak dengan kecepatan konstan memiliki momentum linear konstan. Artinya tidak ada gaya total yang bekerja pada benda itu atau total gaya bernilai nol. Apabila benda bergerak dengan kecepatan sudut konstan maka momentum sudut benda konstan, kita bisa segera berpendapat torsi total pada benda itu adalah nol. Bila gaya dan torsi pada benda nol, maka benda tidak akan mengalami perubahan gerak maupun rotasi atau kita katakan benda dalam kesetimbangan. Kita akan membahas kesetimbangan statis, jadi mula-mula benda diam dan tetap diam.

### 1. Kestimbangan Statis

Ambillah sebuah papan dan letakkan di atas tumpukan batu bata. Kemudian berikan gaya yang sama pada kedua sisi papan dengan arah berlawanan. Apa yang terjadi? Sekarang kita ubah letak gaya. Tekan papan ke arah bawah pada salah satu sisi dan dorong papan pada sisi yang lain usahakan bagian papan di atas tumpukan batu bata tidak bergeser. Apa yang terjadi? Skema yang kalian lakukan seperti pada gambar di bawah ini.



**Gambar 6.22** a) Papan diberi 2 gaya yang sama  $F_1 = F_2$ , kedua gaya segaris  
b) Papan diberi 2 gaya yang sama tapi tidak segaris,  $\Sigma F = 0$ , tapi papan berotasi.

Dari Gambar 6.22a kita melihat jika memberikan 2 gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah pada benda-benda tidak akan bergeser atau tidak akan melakukan translasi, karena total gaya adalah nol. Benda akan diam. Bisakah kita mengatakan bila total gaya bernilai nol benda berada dalam kesetimbangan? Gambar (6.22b) menunjukkan 2 gaya yang berlawanan dan sama besar tetapi memiliki garis gaya yang berbeda, benda ternyata bergerak dengan gerakan rotasi. Agar benda tidak berotasi maka torsi pada benda harus sama dengan nol. Sekarang kita dapat menyimpulkan benda berada dalam keadaan setimbang jika:

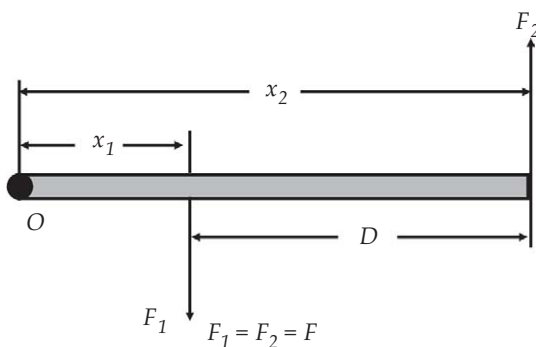
$$\text{Total gaya} = 0 \quad \sum \vec{F} = 0 \quad \dots \quad (33)$$

$$\text{Total torsi} = 0 \quad \sum \vec{\tau} = 0 \quad \dots \quad (34)$$

Jadi syarat kesetimbangan adalah total gaya sama dengan nol dan total torsi sama dengan nol. Jika benda mula-mula diam, kemudian kita beri gaya dan torsi yang setimbang, maka benda akan tetap diam atau terjadi kesetimbangan statis.

### Kopel

Kopel adalah pasangan gaya yang sama besar dan berlawanan arah.



**Gambar 6.23** Dua gaya yang sama besar dan berlawanan arah tetapi memiliki titik tangkap yang berbeda disebut kopel.

Tinjau sebuah batang yang diberi gaya seperti pada gambar (6.23). Kita tidak bisa menggantikan kedua gaya dengan sebuah gaya yang akan memberikan efek yang sama dengan kedua gaya.

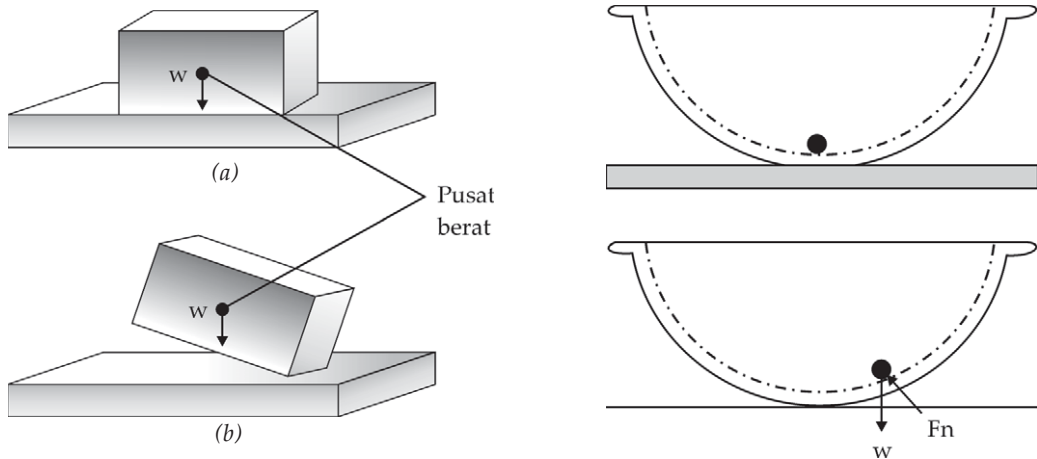
Jumlah kedua gaya tersebut sama dengan nol, tapi kedua gaya tersebut menyebabkan terjadinya rotasi. Torsi yang dihasilkan oleh kedua gaya tersebut terhadap titik O adalah :

$$\tau = Fx_2 - Fx_1 = F(x_2 - x_1) = Fd \quad \dots \quad (35)$$

$F_1$  akan menyebabkan batang berotasi searah jarum jam sedangkan  $F_2$  menyebabkan batang berotasi berlawanan dengan arah jarum jam.

## 2. Jenis Kestimbangan

Kestimbangan bisa kita golongan menjadi tiga, yaitu kestimbangan stabil, kestimbangan tak stabil, dan kestimbangan netral. Suatu benda dikatakan pada kestimbangan stabil jika misalkan pada benda kita beri sedikit gaya, akan muncul gaya pemulih sehingga benda akan kembali ke posisi. Contohnya sebuah balok seperti pada Gambar (6.12) dan benda yang berada dalam lubang yang melingkar seperti pada Gambar (6.23b). Bila balok pada Gambar (6.23) kita rotasikan sedikit, gaya beratnya akan berusaha mengembalikan benda ke posisi semula.

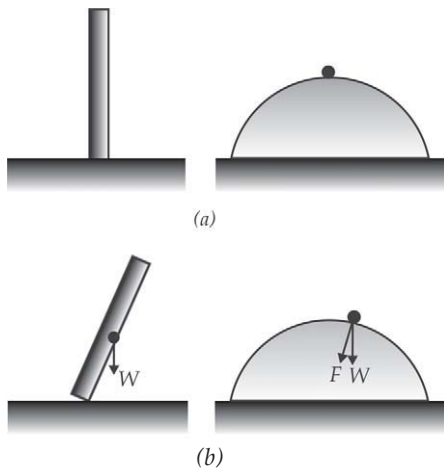


Gambar 6.24 Contoh kestimbangan stabil.

Kestimbangan tak stabil contohnya adalah pada Gambar (6.24). Jika kita beri torsi sedikit akan muncul gaya torsi yang memaksa benda menjauhi posisi semula. Misalkan pada balok pada Gambar (6.24) gaya beratnya akan membuat balok menjadi terguling. Tampak pada kestimbangan stabil benda akan selalu kembali keposisi semula, atau titik beratnya kembali pada posisi semula. Sedang pada kestimbangan tak stabil posisi titik berat berubah, bergeser ke titik yang lebih rendah.

Kita bisa memperbaiki kestimbangan benda dengan berusaha memindahkan titik berat menjadi lebih rendah.

Kesetimbangan netral terjadi jika titik berat benda tidak berubah jika bergerak. Contohnya sebuah silinder yang kita dorong sedikit, maka tidak ada torsi atau gaya yang memaksanya kembali atau menjauhi posisi semula.

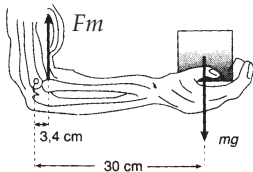


**Gambar 6.25** (a) Contoh benda dengan kesetimbangan stabil, (b) Contoh benda dengan kesetimbangan tak stabil

Jika kalian melihat sirkus, orang yang berjalan di atas tali tambang akan merentangkan kedua tangannya. Dia berusaha mempertahankan kesetimbangannya. Orang yang berjalan tegak mengalami kesulitan untuk mempertahankan kesetimbangannya karena pusat berat harus dipertahankan di atas dasar penopang. Lain halnya dengan hewan berkaki empat yang berjalan dengan keempat kakinya. Hewan tersebut memiliki titik berat yang lebih rendah dan dasar penopangnya lebih besar.



### Contoh Soal 11



Sebuah beban bermassa 7 kg dipegang oleh tangan dengan lengan bawah membentuk sudut  $90^\circ$  terhadap lengan atas. Otot bisep mengerjakan gaya  $F_m$  yang berada 3,4 cm dari titik O di sendi siku. Bila berat lengan dan tangan kita abaikan. Berapa besar gaya yang dikerahkan lengan atas  $F_m$ ?

**Penyelesaian :**

Bila kita gunakan O sebagai titik tumpu putaran, atau pusat rotasi maka persamaan torsi untuk lengan adalah:

$$\tau_w - \tau_{ob} = 0$$

$$0,3 \cdot 7 \cdot 9,8 - 0,024 F_m = 0$$

$$F_m = \frac{0,30 \cdot 7 \cdot 9,8}{0,034}$$

$$= 60,5,3 \text{ N}$$

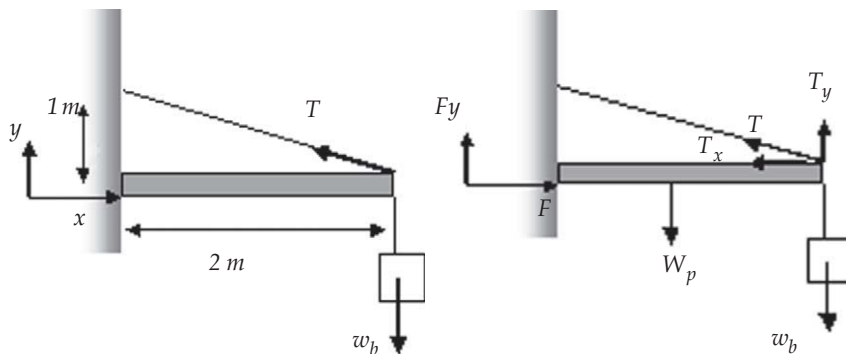
Kesetimbangan statis akan terjadi jika torsi total sama dengan nol dan total gaya sama dengan nol. Agar total gaya bernilai nol, maka harus ada

gaya ke atas sebesar  $605,3 - 68,6 = 536,7$  N. Agar tidak ada torsi tambahan maka gaya ini harus lewat O, gaya ini dikerahkan oleh lengan atas pada siku.



## Contoh Soal 12

Sebuah benda bermassa 10 kg digantungkan pada ujung papan yang panjangnya 2 m bermassa 5 kg. Sebuah kawat dikaitkan pada ujung gambar dan di dinding setinggi 1 m seperti pada gambar. Carilah tegangan kawat dan gaya yang dikerjakan oleh dinding pada tongkat di titik O.



Agar tercapai kesetimbangan statis:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0$$

$$F_x - T_x = 0 \quad \text{dan} \quad F_y + T_y - w_b - w_p = 0$$

$$F_x = T_x \quad F_x + T_x - 100 - 50 = 0$$

$$\sum \tau = 0$$

$$2 \cdot 100 + 1 \cdot 50 - 2T_y = 0$$

$$2T_y = 150$$

$$T_y = 75$$

maka kita bisa mencari  $F_x$

$$F_x = -T_x + 100 + 50$$

$$F_x = -75 + 150$$

$$= 75 \text{ N}$$

antara  $T_x$  dan  $T_y$  memiliki kaitan

$$\frac{T_y}{T_x} = \tan \theta = \frac{1 \text{ m}}{-2 \text{ m}}$$

maka besar  $T_x = -2T_y = -150$  N, dan besar  $F_x = T_x = 150$  N



## Ringkasan

### 1. Torsi

Sebuah partikel yang dikenai gaya akan mengalami gerak translasi tanpa rotasi.

Suatu benda tegar dikenai gaya dapat bergerak translasi ataupun rotasi atau keduanya.

Benda tegar adalah benda yang jarak antartitik-titik pada benda tidak berubah.

Torsi didefinisikan sebagai hasil kali gaya dengan lengan torsi.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Besar torsi:

$$\tau = rF \sin \theta$$

dengan  $\theta$  = sudut apit antara  $\vec{r}$  dan  $\vec{F}$ . Lengan torsi sebuah gaya didefinisikan sebagai panjang garis yang ditarik di titik sumbu rotasi sampai memotong tegak lurus garis kerja gaya. Benda yang mendapat torsi akan berotasi.

### 2. Pusat massa dan pusat gaya

Posisi pusat massa suatu sistem partikel didefinisikan sebagai:

$$x_{pm} = \frac{\sum_{i=1} x_i m_i}{M}$$

Pusat massa sistem bergerak seperti sebuah partikel yang memiliki massa sama dengan massa sistem partikel.

$$x_G = \frac{\sum x_i w_i}{W}$$

Posisi pusat massa sama dengan posisi pusat gaya bila percepatan gravitasi pada seluruh titik benda tegar sama.

### 3. Momen inersia dan tenaga kinetik rotasi

Tenaga kinetik partikel yang bermassa  $m$  yang berotasi dengan kelajuan sudut  $\omega$  adalah:

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Momen inersia sebuah partikel bermassa  $m$  yang berjarak  $r$  dari sumbu rotasi :

$$I = mr^2$$

Tenaga kinetik benda tegar yang berotasi adalah :

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2$$

dengan  $I$  adalah momen inersia sistem benda:

$$I = \sum m_i r_i^2$$

Momen inersia analog dengan massa dalam gerak translasi.



4. Hukum kedua Newton untuk rotasi  
Hukum kedua Newton untuk rotasi benda tegar melalui sumbu tetap adalah:

$$\tau = I\alpha$$

5. Momentum sudut  
Momentum sudut didefinisikan sebagai hasil perkalian silang antara vektor  $r$  dan momentum linearnya.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

Besar momentum sudut sistem partikel dengan kelajuan  $w$  adalah:

$$L = rmv = rm(r\omega) = I\omega$$

Hukum Newton dalam bentuk momentum untuk gerak rotasi adalah:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau}$$

6. Hukum kekekalan momentum  
Jika torsi total yang bekerja pada sistem partikel adalah nol maka momentum sudut partikel kekal

7. Pada gerak gabungan antara gerak rotasi dan translasi. Tenaga kinetik sistem partikel yang berotasi sekaligus bertranslasi adalah:

$$K = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

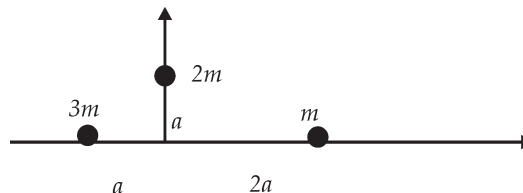


## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

- A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Tiga buah partikel dengan massa  $m$ ,  $2m$ ,  $3m$  dipasang pada ujung kerangka yang massanya diabaikan. Sistem terletak pada bidang  $xy$ . Jika sistem diputar terhadap sumbu  $y$ , maka momen inersia sistem adalah ....



- A.  $5 ma$   
B.  $7 ma$   
C.  $5 ma^2$   
D.  $6 ma^2$   
E.  $7 ma^2$

2. Dari keadaan diam, benda tegar melakukan gerak rotasi dengan percepatan sudut  $15 \text{ rad/det}^2$ . Titik  $A$  berada pada benda tersebut, berjarak  $10 \text{ cm}$  dari sumbu putar. Tepat setelah benda berotasi selama  $0,4 \text{ detik}$ ,  $A$  mengalami percepatan total sebesar ....
  - A.  $1,5 \text{ m/det}$
  - B.  $2,1 \text{ m/det}$
  - C.  $3,6 \text{ m/det}$
  - D.  $3,9 \text{ m/det}$
  - E.  $5,1 \text{ m/det}$
  
3. Sebuah benda bermassa  $m$  diikat pada seutas tali kemudian diputar secara horisontal dengan kecepatan sudut  $\omega$ . Panjang tali  $1 \text{ meter}$ . Momentum sudut yang dialami benda tersebut sebesar ....
  - A.  $\ell m\omega$
  - B.  $\ell^2 m$
  - C.  $\ell m^2$
  - D.  $\ell m\omega^2$
  - E.  $\ell m^2\omega$
  
4. Benda  $A$  bermassa  $m$  diikat dengan tali yang panjangnya  $1 \text{ m}$ . Benda  $B$  memiliki massa  $3m$  diikat dengan tali dengan panjang sama dengan benda  $A$ . Bila  $A$  dan  $B$  diputar dengan kecepatan sudut yang sama maka besar momentum sudut  $B$  ....
  - A. 3 kali momentum sudut  $A$
  - B.  $\frac{1}{3}$  kali momentum sudut  $A$
  - C. 9 kali momentum sudut  $A$
  - D.  $\frac{1}{9}$  kali momentum sudut  $A$
  - E.  $\sqrt{3}$  kali momentum sudut  $A$

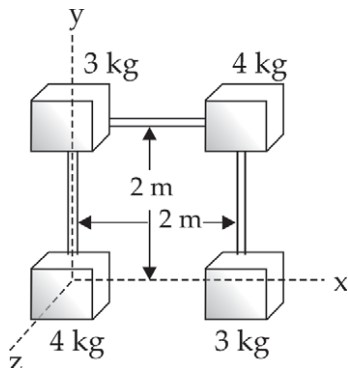
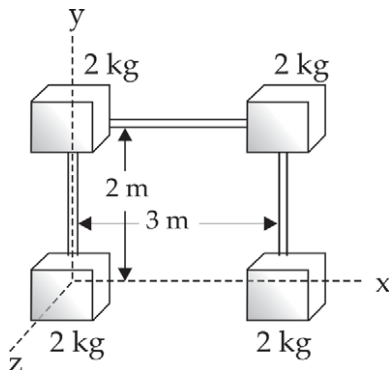
5. Seorang penari balet berputar dengan kecepatan sudut  $\omega$  memiliki momen inersia sebesar  $I$ . Agar penari tersebut bergerak dengan kecepatan sudut yang lebih besar yang harus dilakukan penari tersebut adalah ....
- meregangkan lengannya agar momen inersianya lebih besar
  - menekuk kedua lengannya agar momen inersianya menjadi lebih besar
  - meregangkan kedua lengannya agar momen inersianya menjadi lebih kecil
  - menekuk kedua lengannya agar momen inersianya menjadi lebih kecil
  - menekuk kedua kakinya agar lebih pendek
6. Sebuah kulit silinder berjari-jari  $R$  bermassa  $M$  memiliki momen inersia sebesar  $MR^2$  kg/m<sup>2</sup>, bergerak dengan kecepatan sudut  $\omega$ . Agar kulit silinder tersebut berhenti berputar dalam waktu 2 detik, maka torsi yang harus dikenakan pada silinder sebesar ....
- $MR^2\omega$  N
  - $\frac{MR^2\omega}{2}$  N
  - $MR^2\omega$  Nm
  - $2M^2R\omega$  Nm
  - $\frac{MR^2\omega}{2}$  Nm
7. Sebuah kulit silinder berjari-jari  $R$  meter bermassa  $M$  kg memiliki momen inersia sebesar  $MR^2$  kgm<sup>2</sup>, bergerak dengan kecepatan sudut  $\omega$ . Agar kulit silinder tersebut berhenti berputar dalam waktu 2 detik, maka usaha luar yang harus dikenakan pada silinder sebesar ....
- $\frac{1}{2} M\omega^2$  J
  - $\frac{1}{2} MR^2\omega^2$  J
  - $MR^2\omega^2$  J
  - $\frac{1}{2} MR\omega^2$  J
  - $MR^2\omega$  J

8. Bila torsi yang bekerja pada suatu benda adalah sebesar 0, maka ....
- A. kecepatan sudutnya kekal
  - B. momentum sudutnya kekal
  - C. momentum sudutnya juga nol,
  - D. kecepatan sudutnya juga nol
  - E. momentum sudut dan kecepatan sudutnya nol
9. Seorang penari balet berputar 3 putaran per detik dengan kedua lengannya direntangkan. Pada saat itu momen inersia penari  $8 \text{ kg/m}^2$ . Kemudian kedua lengannya dirapatkan sehingga momen inersianya menjadi  $2 \text{ kgm}^2$ . Frekuensi putaran sekarang menjadi ....
- A. 10 putaran per detik
  - B. 12 putaran per detik
  - C. 16 putaran per detik
  - D. 24 putaran per detik
  - E. 48 putaran per detik
10. Usaha yang dilakukan selama 90 putaran oleh gaya 20 N bekerja pada roda berjari-jari 20 cm adalah ....
- A. 90 nJ
  - B. 180 J
  - C. 360 nJ
  - D. 720 J
  - E. 1440 nJ

**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

1. Sebuah tali dililitkan mengelilingi sebuah silinder 3 kg yang berjari-jari 10 cm yang bebas berputar mengelilingi sumbunya. Tali ditarik dengan gaya 15 N. Silinder semula diam saat  $t = 0$ .
- a. Carilah torsi yang dikerjakan oleh tali dan percepatan sudut silinder.
  - b. Carilah kecepatan sudut silinder pada saat  $t = 4 \text{ det.}$

2. Tiga buah massa masing-masing bermassa 2 kg yang diletakkan pada sumbu  $x$  di  $x = 0$ ,  $x = 0,2$  dan  $x = 0,5$ . Carilah pusat massa sistem itu!
3. Tiga buah benda masing-masing bermassa 2 kg ditempatkan pada titik-titik:  $x = 10 \text{ cm}, y = 0$ ;  $x = 0, y = 10 \text{ cm}$ ;  $x = 10 \text{ cm}, y = 10 \text{ cm}$ . Carilah letak pusat massa ketiga benda tersebut!



4. Empat buah partikel seperti pada gambar di samping yang dihubungkan dengan kawat tak bermassa.
  - a. Carilah momen inersia sistem jika diputar terhadap sumbu  $z$ !
  - b. Tenaga kinetik sistem jika diputar terhadap sumbu  $z$  adalah 184 J. Berapa putaran yang terjadi tiap menit?
5. Empat buah partikel terletak seperti pada gambar di samping. Partikel dihubungkan oleh kawat yang tidak bermassa.
  - a. Hitunglah momen inersia sistem yang diputar terhadap sumbu  $z$ !
  - b. Hitunglah momen inersia sistem yang diputar terhadap sumbu  $y$ !
  - c. Berapa kerja yang dibutuhkan untuk menghasilkan rotasi 2 rad/s terhadap sumbu  $z$  jika mula-mula sistem diam?
6. Sebuah bola pada bermassa 1,2 kg memiliki diameter 18 cm berputar terhadap diameternya dengan laju 90 putaran tiap detik.
  - a. Berapakah energi kinetik rotasinya?
  - b. Bila kemudian ditambahkan energi sebanyak 2 J pada sistem, berapakah kelajuan sudutnya yang baru?

7. Carilah momen inersia sebuah cakram berjari-jari  $R$  terhadap sumbu di bidang cakram yang melewati pusatnya massanya!
8. Sebuah partikel bermassa 3 kg bergerak dengan kelajuan konstan 4 m/s dengan lintasan berupa lingkaran berjari-jari 5 m.
  - a. Berapakah momentum sudutnya terhadap pusat lingkaran?
  - b. Carilah momen inersianya terhadap sumbu yang lewat pusat lingkaran dan tegak lurus bidang geraknya!
  - c. Berapa kelajuan sistem partikel?
9. Sebuah partikel bergerak dengan lintasan berupa lingkaran.
  - a. Jika momentum linearnya  $p$  menjadi dua kali besar momentum semula, bagaimana pengaruhnya terhadap momentum sudutnya?
  - b. Jika jari-jari lingkaran dijadikan dua kali jari-jari semula tetapi kelajuannya tidak berubah, bagaimana pengaruhnya terhadap momentum sudut partikel?
10. Sebuah silinder homogen berjari-jari 15 cm memiliki massa 45 kg menggelinding tanpa selip sepanjang lantai horisontal dengan kelajuan 6 m/s. Berapa kerja yang dibutuhkan untuk menghentikan silinder ini?
11. Sebuah bola menggelinding tanpa selip menuruni sebuah bidang miring dengan sudut  $\theta$ .
  - a. Carilah percepatan bola!
  - b. Carilah gaya gesekan!
  - c. Sudut maksimum bidang miring agar bola menggelinding tanpa selip. Nyatakan dalam koefisien gesekan  $m_s$ !



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. torsi,
2. pusat massa,
3. momen inersia dan tenaga kinetik rotasi,
4. hukum Newton II untuk rotasi,
5. momentum sudut,
6. hukum kekekalan momentum sudut,
7. gabungan gerak translasi dan rotasi, dan
8. kesetimbangan.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab VII

# Mekanika Fluida

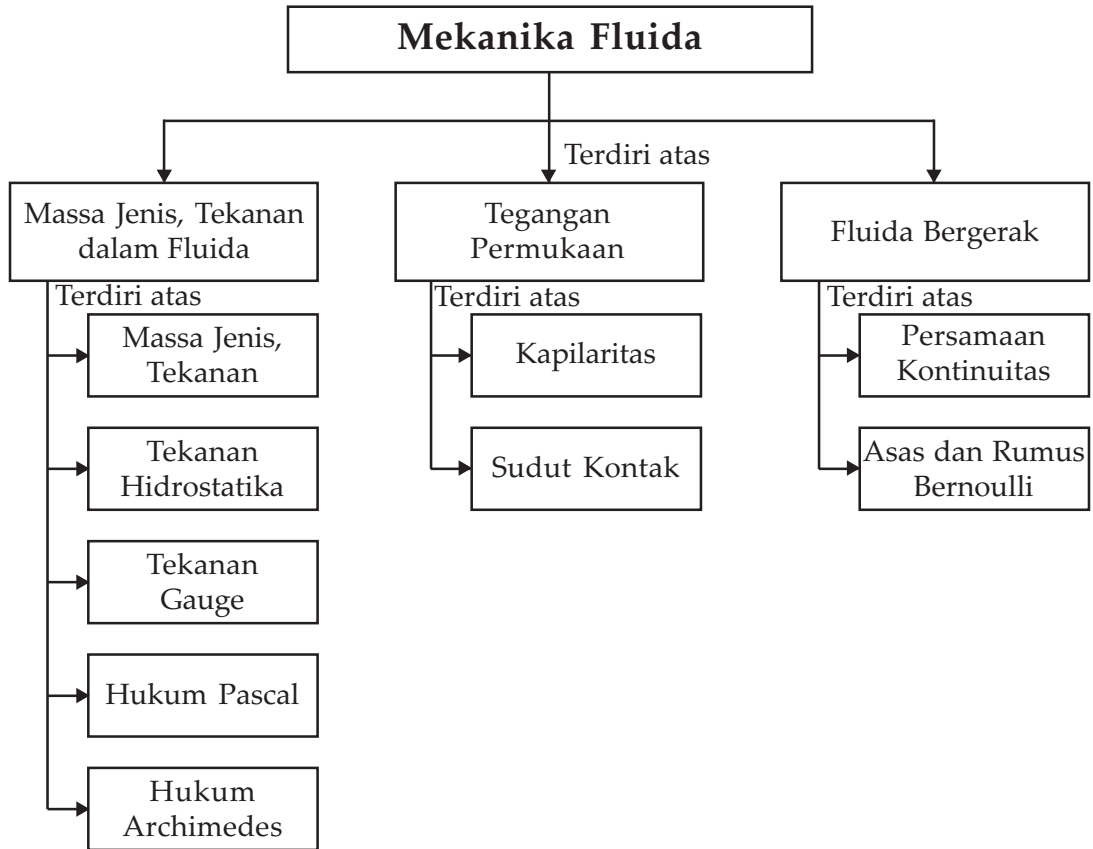


Sumber : Internet.[www.kemiki.com](http://www.kemiki.com).

Fluida bergerak dan mengalir akibat dari adanya perbedaan tekanan pada dua bagian yang berbeda. Sifat tersebut dapat dimanfaatkan dalam bidang teknologi. Gambar di atas memperlihatkan proses pengecatan rangka mobil. Tekanan yang tinggi pada tabung cat mengakibatkan zat cair di dalamnya keluar sebagai butir-butiran yang halus, sehingga hasil pengecatan lebih halus dan efisien.



# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini diharapkan kalian dapat :

1. menganalisis hukum-hukum fluida yang statik/diam,
2. menganalisis hukum-hukum fluida bergerak, dan
3. memahami penerapan hukum-hukum mekanik fluida dalam kehidupan sehari-hari.



## Motivasi Belajar

Zat secara umum dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu cair, padat, dan gas. Dari ketiga zat itu, zat cair dan zat gas termasuk dalam fluida karena dapat mengalir dan mampu memberi hambatan saat ditekan. Gaya gravitasi juga berpengaruh terhadap fluida yang ada di sekeliling kita. Marilah kita tinjau pengaruh gravitasi terhadap fluida.



## Kata-kata Kunci

massa molar, kinetika gas, gas ideal, tenaga kinetik rata-rata, teorema ekipartisi, tenaga internal

Zat cair memiliki sifat yang berbeda dengan zat padat atau dengan benda tegar. Zat cair tidak mampu menahan tegangan geser sehingga bentuknya akan berubah menurut tempatnya. Kita akan mempelajari fluida statis, hukum-hukum mengenai fluida statik kemudian kita akan mempelajari fluida yang mengalir, serta hukum-hukum yang berlaku pada fluida yang mengalir.

## A. Massa Jenis dan Tekanan dalam Fluida

### 1. Massa Jenis dan Tekanan

Kita sering mendengar tentang kerapatan atau massa jenis, kerapatan berat, dan kerapatan relatif. Apa yang dimaksud dengan istilah-istilah tersebut? *Kerapatan* atau *massa jenis* didefinisikan sebagai massa persatuan volume atau kerapatan adalah perbandingan antara massa terhadap volumenya. Bila kerapatan kita beri simbol  $\rho$  maka kerapatan dapat kita tuliskan:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \dots (1)$$

Satuan kerapatan adalah  $\text{kg/m}^3$ .

*Kerapatan berat* adalah berat persatuan volume atau dapat dituliskan sebagai:

$$\rho_g = \frac{mg}{V} \quad \dots \quad (2)$$

*Massa jenis relatif* adalah perbandingan antara massa jenis benda dengan masa jenis air dengan volume yang sama.

$$\rho_{\text{relatif}} = \frac{\rho_{\text{benda}}}{\rho_{\text{air}}} \quad \dots \quad (3)$$

Fluida memiliki sifat yang berbeda dengan benda padat. Bentuk benda padat tidak akan berubah meskipun kita memindahkannya dari satu tempat ke tempat yang lain. Tidak demikian dengan fluida, bentuk fluida akan berubah-ubah sesuai dengan tempatnya. Sebagai contoh fluida adalah air. Tuangkan air ke dalam gelas bagaimana bentuk air, seperti gelas bukan? Sekarang pindahlah air dalam gelas tadi ke dalam mangkok, bentuk air akan berubah mengikuti bentuk mangkok. Salah satu sifat fluida adalah tidak dapat menopang tegangan geser sehingga bentuknya akan berubah sesuai bentuk tempatnya.

Masukan sebuah benda dengan luas penampangnya  $A$  ke dalam fluida. Tekanlah ke bawah benda tersebut. Apa yang kalian rasakan? Kalian akan merasakan ada tekanan pada tangan yang disebabkan oleh fluida. Fluida memberikan sebuah gaya yang tegak lurus pada setiap permukaan benda yang ada di dalam fluida. Gaya persatuan luas yang diadakan oleh fluida sama di setiap titik pada permukaan benda pada kedalaman yang sama. Gaya persatuan luas ini dinamakan tekanan Fluida:

$$P = \frac{F}{A} \quad \dots \quad (4)$$

Satuan tekanan dalam SI adalah Newton persegi ( $\text{N/m}^2$ ) yang dinamakan Pascal (Pa).

$$1\text{Pa}=1 \text{ N/m}^2$$

Bila kita membahas fluida kita akan mengenal apa yang disebut sebagai modulus Limbak atau modulus Bulk  $B$ .

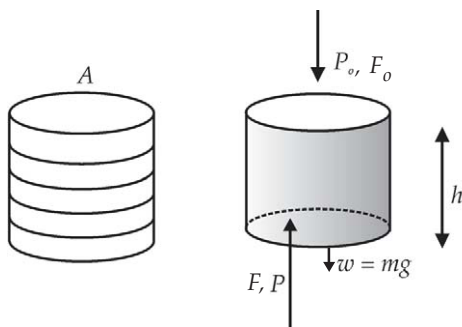
$$B = \frac{P}{\Delta V/V} \quad \dots \quad (5)$$

Tekanan yang disebabkan fluida cenderung menekan benda itu sehingga volumenya mengecil. Karena volumenya mengecil saat mendapat tekanan dari luar, maka diberikan tanda negatif agar  $B$  bernilai positif.

## 2. Tekanan Hidrostatika

Perhatikanlah mengapa bendungan semakin dalam dindingnya semakin tebal? Karena semakin dalam maka tekanan di dalam fluida akan semakin besar. Benarkah demikian? Kita akan mencoba mencari tahu mengapa demikian.

Mari kita tinjau sebagian kecil fluida berbentuk silinder dengan ketinggian  $h$  dengan luas penampang  $A$  seperti pada Gambar (7.1).



**Gambar 7.1** Kita bisa mengambil sebagian kecil cairan dari seluruh cairan. Sebagian cairan yang kita ambil terbentuk dari lapisan-lapisan cairan yang membentuk silinder.

Fluida dapat kita anggap terdiri dari beberapa lapis. Lapisan di atas akan membebani lapisan di bawahnya. Tekanan pada lapisan teratas hanya berasal dari tekanan udara luar  $P_o$ , lapisan yang di bawahnya mendapat tekanan dari udara luar dan dari berat lapisan di atasnya. Lapisan-lapisan fluida-fluida tadi diam di dalam fluida dan mendapat tekanan dari fluida yang lain baik di atas maupun di bawahnya. Karena silinder fluida diam maka resultan gaya yang dialami adalah nol. Mari kita lihat pada permukaan di bawah silinder. Gaya totalnya harus nol. Tekanan dari atas

berasal dari  $P_o$  yaitu tekanan di atas silinder sehingga gaya dari atas adalah:

$$F_o = P_o A \quad \dots (6)$$

Tekanan yang disebabkan oleh gaya berat sebesar  $F = mg$ , sedangkan tekanan dari bawah berasal dari fluida yang berada di bawah silinder sehingga gaya dari bawah silinder fluida adalah  $F = PA$ . Karena luas penampang atas sama dengan luas penampang bawah yaitu  $A$  kita dapat menuliskan persamaan gaya pada permukaan bawah silinder adalah:

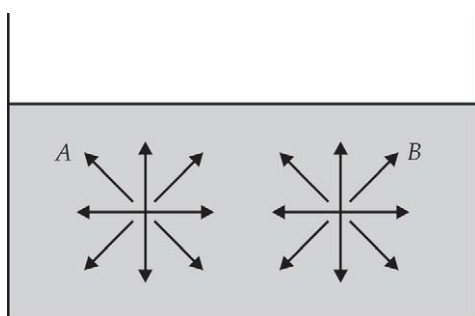
$$F = F_o + mg \quad \dots (7)$$

Bila fluida memiliki kerapatan  $\rho$  maka massa fluida dalam silinder adalah  $m=\rho V=\rho Ah$ . Sehingga persamaan (7) dapat kita tuliskan sebagai:

$$F = F_o + \rho g Ah \quad \dots \quad (8)$$

Bila kedua ruas persamaan (8) kita bagi dengan  $A$  maka akan kita dapatkan tekanan di dasar silinder fluida adalah:

$$P = P_o + \rho gh \quad \dots \quad (9)$$



**Gambar 7.2** Titik-titik yang kedalamannya sama maka tekanannya sama ke segala arah

Tekanan di dasar silinder harus lebih besar dari tekanan di atas silinder untuk menopang berat silinder. Hal ini tampak pada persamaan (9). Tekanan pada kedalaman  $h$  lebih besar dari tekanan di bagian atas dengan selisih sebesar  $\rho gh$  dan ini berlaku untuk fluida dalam bejana apapun, tidak bergantung pada bentuk bejana. Pada setiap titik di kedalaman yang sama memiliki tekanan yang sama. Pernyataan ini disebut sebagai *Hukum Pokok Hidrostatika*.

#### ***Hukum Pokok Hidrostatika :***

*Titik-titik pada kedalaman yang sama memiliki tekanan yang sama.*



#### **Life Skills : Kecakapan Akademik**

Kalian dapat menggunakan barang bekas seperti botol plastik bekas minuman yang transparan. Kemudian lubangi dinding botol secara melingkar dengan ketinggian yang sama. Lakukan yang sama dengan botol yang lain, tapi ketinggiannya berbeda dengan botol yang pertama. Isi dengan air dan lihatlah air yang memancar dari lubang botol. Berapa jarak yang ditempuh oleh air yang memancar? Mana yang paling jauh memancar?



## Contoh Soal 1

Bila tekanan di permukaan adalah 101 kPa, carilah tekanan yang dialami sebuah kapal yang berada di kedalaman 100 m di bawah permukaan laut. Jika  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$P_o = 101 \times 10^3 \text{ Pa}, \quad h = 100 \text{ m}$$

*Jawab :*

Dengan menggunakan persamaan (9):

$$\begin{aligned} P &= P_o + \rho gh \\ &= 101 \times 10^3 \text{ Pa} + (10^3 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ N/m})(100 \text{ m}) \\ &= 1081 \text{ kPa} \end{aligned}$$



## Contoh Soal 2

Sebuah pipa U berisi dua cairan dengan kerapatan berbeda pada keadaan setimbang. Di pipa sebelah kiri berisi minyak yang tidak diketahui kerapatannya, di sebelah kanan berisi air dengan kerapatan  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Bila selisih ketinggian di permukaan air adalah  $h = 13 \text{ mm}$  dan selisih ketinggian antara minyak dan air adalah  $15 \text{ mm}$ . Berapakah kerapatan minyak?

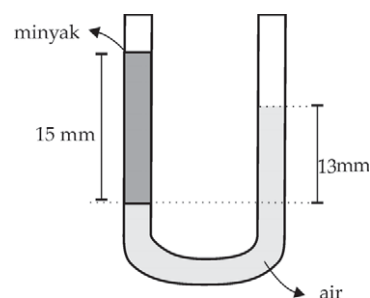
**Penyelesaian :**

Tekanan di sebelah kiri pipa disebabkan karena tekanan atmosfer dan berat minyak. Tekanan di sebelah kanan pipa adalah karena berat air dan tekanan atmosfer. Tekanan pada titik yang segaris adalah sama sehingga:

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$$

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \quad \rho_1 = \frac{\rho_2 h_2}{h_1} = \frac{(1000 \text{ kg/m}^3)(13 \text{ mm})}{(15 \text{ mm})} = 866,7 \text{ kg/m}^3$$

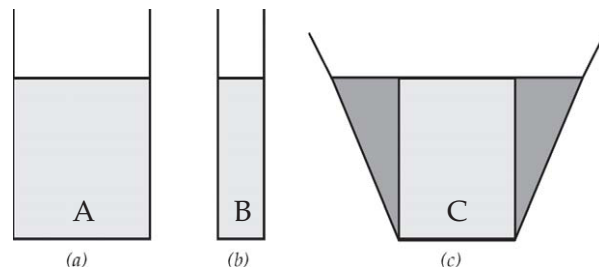
Jadi kerapatan minyak adalah  $866,7 \text{ kg/m}^3$ .



## Paradoks hidrolik

Amatilah bentuk bejana pada Gambar (7.3). Gambar tersebut menunjukkan bejana dengan bagian-bagian air yang bentuknya berbeda-beda. Menurut kalian mana yang tekanannya paling besar? Sekilas tampaknya di bejana yang paling besar dibagian yang sempit. Tetapi jika kalian memerhatikan persamaan (9), bukankah yang mempengaruhi tekanan adalah ketinggian bukan bentuk bejana? Keadaan yang tampaknya berlawanan ini disebut sebagai *paradoks hidrostatik*.

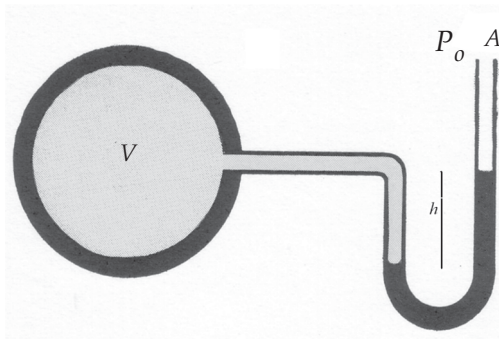
Tekanan hidrostatik tidak tergantung pada bentuk bejana tetapi hanya tergantung pada kedalaman. Tekanan di titik A, B, dan C adalah sama. Air di bejana terbesar memang lebih berat dari bejana yang lain, tetapi sebagian berat air yang diberi tanda gelap, ditopang oleh sisi bejana yang miring. Sisi yang miring memberikan gaya normal terhadap tekanan air, dan gaya normal ini memiliki komponen ke atas yang menopang berat air.



Gambar 7.3 Tekanan pada dasar ketiga bejana sama

## 3. Tekanan Gauge

Sifat fluida ini beda tekanan pada fluida sebanding dengan kedalaman dapat kita gunakan untuk mengukur tekanan yang tidak kita ketahui. Mari kita tinjau alat pengukur tekanan yang sederhana yaitu manometer tabung terbuka. Salah satu ujung tabung yang terbuka dihubungkan dengan ruangan yang hendak kita cari tekanannya, sehingga tekanannya adalah tekanan ruangan. Misalkan tekanannya kita sebut  $P$ . Ujung



Sumber : IPP, Growlier

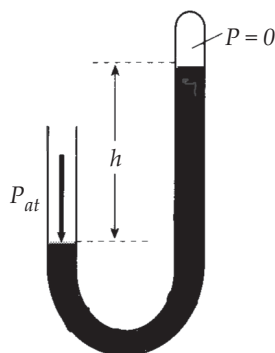
**Gambar 7.4** Manometer terbuka dihubungkan dengan ruangan dengan volume V.

yang lain dibiarkan terbuka, sehingga tekanan di ujung ini adalah tekanan udara luar yaitu  $P_o$  atau tekanan atmosfer. Karena adanya tekanan  $P$  maka cairan dalam manometer akan berbeda ketinggiannya sebesar  $h$  lihat Gambar (7.4).

Perbedaan tekanan antara  $P$  dan  $P_o$  disebut sebagai *tekanan Gauge*. Tekanan  $P$  disebut tekanan mutlak. Kita bisa mengatakan bahwa tekanan mutlak adalah tekanan Gauge + tekanan atmosfer.

$$P = P_{Gauge} + P_{atm} \quad \dots \quad (10)$$

Besarnya tekanan Gauge adalah  $\rho gh$ . Kerapatan cairan adalah  $\rho$  dalam manometer dan  $h$  selisih ketinggian cairan dalam manometer. Tekanan Gauge merupakan tekanan yang ditunjukkan oleh alat ukur. Dalam hal ini alat ukurnya adalah manometer terbuka.



**Gambar 7.5** barometer pipa tertutup U. Barometer ini digunakan untuk mengukur tekanan atmosfer.

Pada manometer pipa terbuka:

$$P = \rho gh + P_{atm} \quad \dots \quad (11)$$

Bagaimana jika kita menggunakan barometer tertutup? Barometer adalah alat untuk mengukur tekanan udara luar. Mari kita lihat gambar barometer pipa U untuk mengukur tekanan atmosfer di samping ini.

Pada pipa U barometer tekanan di tabung tertutup adalah nol, sedang tekanan pada ujung pipa terbuka adalah tekanan atmosfer. Besarnya tekanan atmosfer dengan demikian adalah:

$$P = \rho gh + 0$$

$$P = \rho gh \quad \dots \quad (12)$$





### Contoh Soal 3

Ketinggian air raksa pada Barometer pipa U di suatu tempat adalah 760 mm.

- Berapakah tekanan atmosfer di tempat itu bila  $r$  air raksa adalah  $13,595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ?
- Jika pipa tidak berisi air raksa tetapi digunakan air, berapa tinggi kolom air di tempat itu?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$h = 760 \text{ mm},$$

$$r_{\text{air raksa}} = 13,595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

*Jawab :*

- Dengan menggunakan persamaan (9) maka:

$$\begin{aligned} P &= (13,595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/det}^2) \\ &\quad (760 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 101,255 \text{ Pa} \end{aligned}$$

- Jika pipa tidak berisi air raksa tetapi air yang kerapatannya  $1.000 \text{ kg/m}^3$ .

$$\begin{aligned} 101,255 &= (10^3 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/det}^2)(hm) \\ h &= 10,3 \text{ m atau } 10300 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tekanan diberi satuan mm Hg, atau ftH<sub>2</sub>O atau atm:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 760 \text{ mmHg} = 33,9 \text{ ft H}_2\text{O} \\ &= 101,325 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr} = 133,3 \text{ Pa}$$



### Contoh Soal 4

Ketinggian kolom barometer air raksa pada suatu ruangan pada suhu  $-5^\circ$  adalah 740 cm. Kerapatan air raksa saat itu adalah  $1,3608 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ .

Berapa tekanan udara di ruang itu?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$\rho = 1,3608 \times 10^4 \text{ kg/m}^3, h = 7,40 \text{ m}$$

Jawab :

$$P = \rho gh$$

$$= (1,3608 \times 10^4 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/det}^2)(7,40 \text{ m})$$

$$= 98,69 \text{ kPa}$$

$$(\text{dalam atm}) = (98,69 \text{ kPa})/(101,325 \text{ kPa/atm})$$

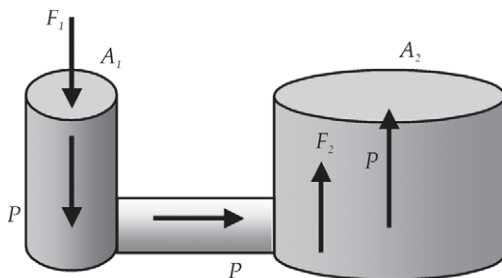
$$= 0,97 \text{ atm}$$

#### 4. Hukum Pascal

Ambillah kembali botol plastik bekas minuman pada percobaan di atas. Isilah botol tadi dengan air sampai penuh. Perhatikan apa yang terjadi. Bila kemudian kita memberikan tekanan pada air di dalam botol di bagian atas, apa yang terjadi? Bandingkan jarak maksimal sebelum kalian memberi tekanan, dan setelah diberi tekanan? Apakah setelah diberi tekanan jarak maksimal bertambah dengan penambahan yang sama untuk semua lubang?

Kita telah mengetahui bahwa tekanan pada kedalaman yang sama adalah sama. Hal ini akan tampak dengan jarak tetesan air sama pada seluruh lubang. Jika pada percobaan sederhana di atas setelah diisi air kemudian ditekan maka air akan mendapat pertambahan tekanan yang sama di seluruh fluida. Keadaan ini dikenal sebagai hukum Pascal.

**Hukum Pascal** berbunyi tekanan yang diberikan pada suatu cairan pada bejana yang tertutup diteruskan ke setiap titik dalam fluida dan ke dinding bejana.



Salah satu contoh penggunaan hukum Pascal adalah pada dongkrak hidrolik. Gambar dongkrak hidrolik adalah Gambar (7.6).

**Gambar 7.6** Dongkrak hidrolik, tekanan pada luasan.  $A_1$  diteruskan fluida sampai ke luasan  $A_2$ .

Bila pada permukaan  $A_1$  diberi gaya  $F_1$  maka tekanan di  $A_1$  akan diteruskan sehingga cairan akan mendapat tambahan tekanan sebesar:

$$P = \frac{F_1}{A_1}$$

Ujung permukaan  $A_2$  juga akan mendapat penambahan tekanan yang sama sehingga gaya ke atas pada permukaan  $A_2$  adalah:

$$F_2 = PA_2 = \frac{F_1}{A_1} A_2 \quad \dots \quad (13)$$

Bila permukaan  $A_2$  lebih luas daripada permukaan  $A_1$  maka gaya dorong pada permukaan  $A_2$  lebih besar daripada gaya yang diberikan di  $A_1$ . Jadi dengan gaya yang kecil di  $A_1$  kita akan mendapatkan gaya jauh lebih besar yang cukup untuk mengangkat beban berat yang diletakkan di permukaan  $A_2$ .

Salah satu alat yang menggunakan hukum Pascal adalah pengepres hidrolik. Silinder kecil yang terdiri atas sebuah pompa yang memompakan cairan ke silinder besar. Jika pengungkit ditekan ke bawah maka pada katup pada bagian atas pipa akan mendapat dorongan yang besar.



### Contoh Soal 5

Sebuah mobil hendak diangkat dengan menggunakan dongkrak hidrolik. Bila pipa besar memiliki jari-jari 25 cm dan pipa kecil memiliki jari-jari 2 cm. Berapa gaya yang harus diberikan pada pipa kecil bila berat mobil adalah 15.000 N?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$R_1 = 2 \text{ cm}, \quad R_2 = 25 \text{ cm}, \quad F_2 = 15.000 \text{ N}$$

*Jawab :*

Dengan menggunakan persamaan (13):

$$F_1 = F_2 = \frac{A_1}{A_2} = (15.000 \text{ N}) \frac{(\pi 2^2 \text{ cm}^2)}{(\pi 25^2 \text{ cm}^2)} = 9,6 \text{ N}$$

Jadi, gaya yang harus dikerahkan sebesar 9,6 N.

## 5. Hukum Archimedes

Perhatikan beberapa benda-benda di sekitarnya yang dimasukkan dalam air. Ada yang mengapung, melayang, dan tenggelam. Kapan sebuah benda akan mengapung melayang atau tenggelam? Bila benda tadi tetap di tempatnya atau tidak bergerak ke atas atau ke bawah bagaimana gaya yang bekerja pada benda tersebut?

### Percobaan sederhana:

Ambillah sepotong gabus. Letakkan di atas air. Apa yang terjadi? Gabus akan mengapung bukan? Tekanlah gabus agar seluruh gabus berada di dasar air. Lalu lepaskan. Apa yang terjadi? Gabus akan bergerak ke atas sampai kemudian mengapung, bukan?

Gaya yang diberikan oleh fluida pada benda yang berada di dalamnya dinamakan gaya apung. Hal yang memengaruhi gaya apung adalah kerapatan benda dan volume benda.

### *Bunyi hukum Archimedes*

*Sebuah benda yang tenggelam seluruhnya ataupun sebagian dalam suatu fluida benda itu akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan.*

### Percobaan sederhana:

Ambillah gelas, kemudian masukkan air ke dalam gelas tersebut. Masukkan gabus perlahan-lahan. Apa yang terjadi pada air? Saat bagian gabus yang tercelup sebagian, berapa banyak air yang tumpah? Jika seluruh gabus dimasukkan ke dalam air, berapa banyak volume air yang tumpah?

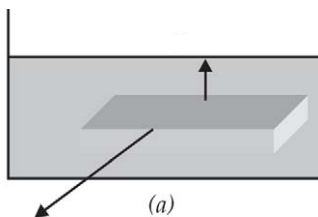
Sekarang kalian memahami banyaknya air yang dipindahkan oleh gabus adalah banyaknya air yang tumpah. Saat sebagian gabus yang masuk maka volume air yang dipindahkan sama dengan volume bagian gabus yang tercelup air. Saat seluruh bagian gabus tercelup air, maka volume air yang dipindahkan sama dengan volume bagian gabus yang tercelup air. Saat seluruh bagian gabus tercelup maka volume gabus yang dipindahkan sama dengan volume seluruh gabus.

Apabila kita melemparkan sebatang kayu kering ke kolam atau sungai, kayu akan mengapung. Kayu mengapung karena ada dorongan ke atas oleh air. Benda yang dapat tenggelam ke dalam air misalnya bola besi. Bola besi akan lebih ringan bila ditimbang di dalam air daripada bila ditimbang di udara. Hal ini disebabkan adanya tekanan air terhadapnya. Berat bola besi bila ditimbang di udara beratnya 40 N, bila ditimbang dalam air beratnya menjadi 35 N. Berarti ada berat yang hilang sebanyak 5 N. Bila bola tadi dimasukkan ke dalam ember yang penuh air, berat air yang tumpah saat dimasukkan air ternyata sama dengan berat bola yang hilang yaitu 5 N. Volume air yang tumpah sama dengan volume bola. Dengan kata lain, meskipun tenggelam bola mendapat tekanan ke atas oleh gaya yang besarnya sama dengan berat air yang dipindahkan.

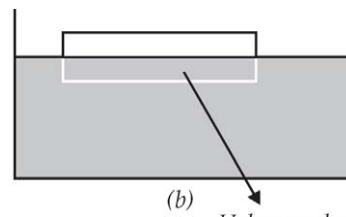
Mari kita meninjau hukum Archimedes dengan menggunakan hukum Newton, kita akan melihat bagaimana gaya yang bekerja pada benda yang mengapung, melayang, dan tenggelam.

### a. Mengapung

Masukkanlah gabus ke dalam air sampai tenggelam. Perhatikan apa yang terjadi pada gabus. Tunggu sampai gabus naik sampai di permukaan air. Apa yang kalian lihat? Bagaimana gerakan gabus saat dilepas? Bagaimana gerakan gabus saat sudah di permukaan?



Volume gabus yang terendam air adalah  $V$



Volume gabus yang terendam air adalah  $V'$

**Gambar 7.7** (a) Gabus ditenggelamkan. (b) Gabus akan bergerak ke atas sampai akhirnya gabus berada di permukaan air, dengan sebagian gabus didalam air. Volume gabus adalah  $V$  dan volume gabus yang terendam air  $V'$

Mari kita tinjau gaya yang bekerja pada gabus. Gabus naik ke atas dengan demikian ada gaya ke atas. Gaya ke atas pada gabus adalah gaya apung atau gaya Archimedes. Besarnya sama dengan berat air yang dipindahkan gabus atau berat air yang volumenya  $V'$ .

$$F_{\text{apung}} = m_{\text{air}}g = \rho_{\text{air}}V'g \quad \dots \quad (14)$$

Gaya yang ke bawah adalah gaya gravitasi besarnya sama dengan berat gabus.

$$F_{\text{berat}} = m_{\text{gabus}}g = \rho_{\text{gabus}}Vg \quad \dots \quad (15)$$

Saat gabus ditenggelamkan, kemudian gabus dilepas gabus bergerak ke atas, dengan demikian gaya total adalah gaya ke atas. Gabus akan bergerak ke atas sampai tercapai keseimbangan antara gaya yang ke bawah dengan gaya yang ke atas. Dengan kata lain gabus akan bergerak ke atas sampai gaya berat mampu mengatasi gaya apung air. Gaya apung akan terus mendorong sampai gabus mulai keluar hingga tercapai berat volume air yang dipindahkan sama dengan berat gabus. Saat di permukaan gabus diam, dengan demikian besar gaya ke atas sama dengan gaya ke bawah atau gaya berat sama dengan gaya apung.

$$F_{\text{apung}} = F_{\text{berat}}$$

$$\rho_{\text{air}}V'g = \rho_{\text{gabus}}Vg \quad \dots \quad (16)$$

Ruas kanan pada Persamaan (16) sama dengan ruas kirinya. Volume gabus yang terendam air  $V'$  lebih kecil dari volume gabus, dengan demikian  $\rho_{\text{gabus}} < \rho_{\text{air}}$ .

Jadi, sebuah benda akan terapung jika kerapatan benda lebih kecil dari kerapatan cairan tempat dia berada. Sedangkan gaya apung sama dengan gaya berat benda.

Benda-benda yang kurang rapat dari cairan yang ditempatinya akan terapung. Timbal akan terapung dalam air raksa karena air raksa lebih rapat daripada timbal. Pernahkah

kalian mencoba mencampur minyak tanah dengan air? Setelah dibiarkan beberapa saat minyak tanah akan terapung di atas air karena minyak tanah kurang rapat daripada air.

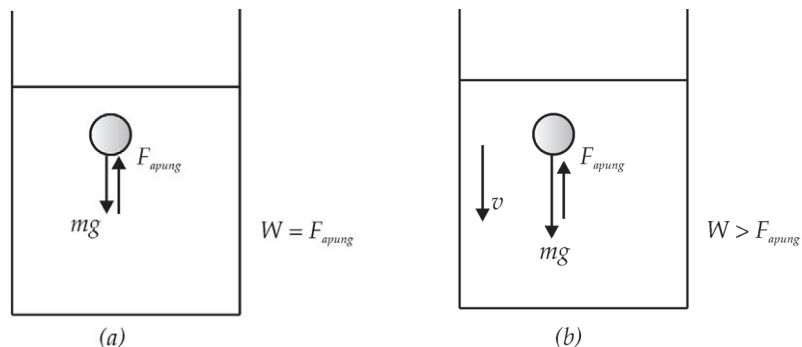
### b. Melayang

Mari kita tinjau benda yang melayang di dalam cairan. Benda berada di dalam cairan tidak bergerak ke atas atau ke bawah, yang berarti gaya ke bawah sama dengan gaya ke atas. Volume air yang dipindahkan sama dengan volume benda karena seluruh volume benda berada di dalam cairan. Lihatlah Gambar (7.7a) Dengan demikian kita bisa menuliskan:

$$F_{\text{apung}} = F_{\text{berat}}$$

$$\rho_{\text{cairan}} Vg = \rho_{\text{benda}} Vg$$

$$\rho_{\text{cairan}} = \rho_{\text{benda}} \quad \dots \quad (17)$$



**Gambar 7.8** (a) Benda yang melayang di dalam cairan. Volume cairan yang dipindahkan sama dengan volume benda, dan gaya ke atas sama dengan gaya berat yang berarah ke bawah. Dengan demikian, kerapatan benda sama dengan kerapatan cairan. (b) Benda bergerak ke bawah dan tenggelam di dalam cairan. Volume cairan yang dipindahkan sama dengan volume benda, gaya apung ke atas lebih kecil daripada gaya berat benda. Kerapatan benda lebih besar dari kerapatan cairan. Benda akan bergerak ke bawah.

Jadi, suatu benda akan melayang bila kerapatannya sama dengan kerapatan cairan tempat benda itu berada. Serta gaya apung sama dengan gaya beratnya.

### c. Tenggelam

Sekarang giliran benda yang tenggelam. Masukkan sepotong besi ke dalam air. Apa yang terjadi? Besi akan bergerak ke bawah, yang berarti gaya berat benda lebih besar dari gaya apung, sehingga total gaya pada besi menuju ke bawah.

$$F_{\text{berat}} > F_{\text{apung}}$$

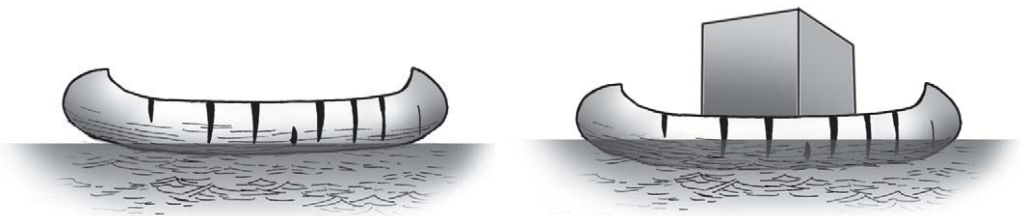
$$\rho_{\text{benda}} Vg > \rho_{\text{air}} Vg \quad \dots \quad (18)$$

atau

$$\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{air}} \quad \dots \quad (19)$$

Jadi, suatu benda akan tenggelam bila kerapatannya lebih besar daripada kerapatan cairan yang ditempatinya.

Sekarang kalian tentu dapat mengerti mengapa sebuah perahu yang mengapung, kemudian dimuati beban yang berat totalnya 210 N akan lebih tenggelam ke dalam air. Perahu akan tenggelam sampai perahu tadi mampu memindahkan air seberat 210 N. Setelah perahu mampu memindahkan air seberat 210 N perahu akan berhenti tenggelam atau tidak bergerak ke bawah lagi.



**Gambar 7.9** (a) Perahu tanpa beban bagian yang tenggelam  $V'$ , (b) Bila dimuati oleh beban maka perahu tenggelam atau bergerak ke bawah sampai volume air yang dipindahkan memiliki berat yang sama dengan berat penumpangnya. Volume perahu yang tercelup air akan bertambah.

Sepotong besi akan tenggelam dalam air, tetapi kapal yang terbuat dari besi baja tidak tenggelam. Mengapa demikian? Kapal tidak padat tetapi berisi ruang-ruang kosong yang berisi udara sehingga kerapatan kapal lebih kecil dari kerapatan besi padat bahkan lebih kecil dari kerapatan air laut.



Kapal yang berlayar di sungai akan tenggelam lebih dalam daripada saat berlayar di laut. Hal ini disebabkan karena air laut banyak mengandung garam sehingga kerapatannya lebih besar daripada kerapatan air sungai.



### Berpikir Kritis

1. Letakkan sebuah telur dalam gelas yang berisi air tawar. Amati apa yang terjadi, di mana posisi telur?
2. Ambil telur lalu masukkan 4 sendok garam dalam gelas kemudian aduklah. Masukkan kembali telur. Apa yang terjadi, di mana posisi telur?
3. Tambahkan air ke dalam gelas kemudian aduk perlahan jangan sampai telur pecah. Tunggulah beberapa saat. Bagaimana posisi telur? Dapatkah kalian menganalisis mengapa terjadi perubahan posisi telur? Apa kaitan antara penambahan air garam dengan posisi telur?



### Contoh Soal 3

Sebuah balok es mengapung di atas air.  $\rho_{es}$  adalah  $920 \text{ kg/m}^3$ .  $\rho_{air}=1000 \text{ kg/m}^3$ . Berapa bagian es yang terletak di atas permukaan air?

**Penyelesaian :**

Diketahui :

$$\rho_{es} = 920 \text{ kg/m}^3, \rho_{air} = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

Dengan menggunakan persamaan (16):

$$F_{apung} = F_{berat}$$

$$\rho_{air} V' g = \rho_{es} V g$$

$$\frac{V'}{V} = \frac{(920 \text{ kg/m}^3)}{(1000 \text{ kg/m}^3)} = 0,9$$

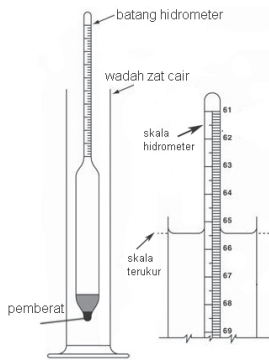
Bagian yang tenggelam adalah 0,9 bagian maka yang terapung 0,1 bagian atau 10%.

## 6. Penerapan Hukum Archimedes

### a. Hidrometer

Hidrometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur massa jenis cairan. Nilai massa jenis dapat kita lihat pada skala yang terdapat pada hidrometer. Hidrometer akan mengapung bila kita masukkan pada suatu cairan. Banyaknya bagian yang mengapung tergantung pada massa jenis cairan.

Hidrometer memiliki massa jenis tertentu yaitu  $\rho_h$ . Jika kita masukkan dalam zat cair, hidrometer akan memindahkan cairan sebesar volume hidrometer yang masuk, misalnya  $V_h$ . Gaya-gaya yang bekerja pada hidrometer adalah gaya apung dan gaya berat yang saling berlawanan arah sehingga:



Gambar 7.10 Hidrometer

$$V_h \rho_c g = \text{berat hidrometer}$$

$$(A h_h) \rho_c g = w$$

$$h_h = \frac{w}{A \rho_c g} = \frac{m}{A \rho_c}$$

Panjang hidrometer adalah  $h_h$ . Jika  $\rho_c$  cairan besar, maka  $h_h$  akan rendah dan menunjukkan angka yang lebih besar. Bila  $\rho_c$  cairan tidak terlalu besar, maka  $h_h$  akan tinggi dan menunjukkan angka yang lebih kecil. Skala pada hidrometer diberi angka kecil di ujung atas hidrometer dan diberi angka yang lebih besar di bagian bawah. Hal ini menunjukkan semakin besar kerapatan cairan maka skala yang ditunjukkan hidrometer juga lebih besar.

Bagian bawah hidrometer diberi pemberat agar hidrometer bisa tegak di dalam cairan. Bagian atas dibuat berbentuk tabung dari kaca agar perubahan berat cairan yang dipindahkan menghasilkan perubahan yang besar pada tangki yang tercelup.

### b. Kapal Laut

Kapal laut terbuat dari besi dan baja namun tidak tenggelam di laut. Kapal dibuat berbentuk sedemikian sehingga memiliki volume yang besar. Bagian dalam kapal memiliki rongga sehingga tidak menyumbang massa tetapi memperbesar volume. Jadi, kerapatan kapal lebih kecil daripada kerapatan air laut.

Kapal laut memiliki kapasitas muatan tertentu, atau memiliki batas muatan maksimal. Batas muatan dibuat

sedemikian sehingga jika kapal diberi muatan sebesar batas maksimalnya, kapal masih terapung dengan ketinggian tertentu. Coba perhatikan jika muatan kapal sedikit maka bagian kapal yang tercelup air juga kecil, jika muatan kapal lebih besar maka kapal lebih berat, bagian yang tercelup akan semakin besar. Saat kapal diberi muatan maksimal kerapatan kapal masih lebih kecil daripada kerapatan air. Kapal yang diberi muatan yang melebihi batas maksimal maka kerapatannya akan lebih besar dari kerapatan air dan kapal akan tenggelam, gaya beratnya lebih besar dari gaya apung.

### c. Kapal Selam



Sumber : [www.wikivisual.com](http://www.wikivisual.com)

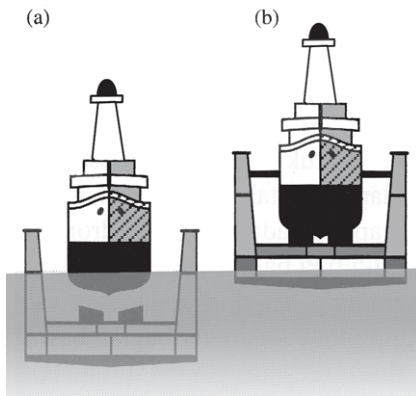
**Gambar 7.11** Kapal selam mempunyai tangki untuk mengisi atau membuang air untuk merubah kerapatan kapal.

Kapal selam dapat mengapung tetapi juga dapat tenggelam. Kapal selam memiliki tangki-tangki pemberat di antara lambung sebelah dalam dan lambung sebelah luar. Kapal selam dapat mengubah kerapatannya dengan cara mengisi atau membuang air dalam tangki pemberat. Saat kapal terapung tangki dikosongkan. Agar kapal dapat tenggelam maka kapal diperberat dengan cara memasukkan air laut ke dalam tangki pemberat. Air laut akan mendesak udara yang berada di dalam tangki. Awak kapal harus mengatur seberapa besar pengisian tangki pemberat sesuai dengan kedalaman yang diinginkan. Agar kapal dapat

melayang dalam air maka berat kapal harus sama dengan gaya apung pada kapal.

Apabila kapal diinginkan terapung kembali maka air laut yang berada ditangki pemberat dikeluarkan sehingga kapal menjadi lebih ringan dan dapat naik ke atas. Air dikeluarkan dengan cara memompakan udara dalam tangki sehingga air terdesak keluar.

Kalian masih ingat bukan bahwa tekanan hidrostatik semakin besar dengan meningkatnya kedalaman air. Kapal selam mendapat tekanan hidrostatik yang semakin besar saat mencapai kedalaman yang besar. Oleh karena itu dinding kapal dibuat tebal supaya mampu menahan tekanan hidrostatik pada kedalaman tertentu. Kapal memiliki batas kedalaman. Jika kapal selam menyelam lebih dari batas kedalaman tersebut, dinding kapal tidak mampu lagi menahan tekanan hidrostatik.



Gambar 7.12 Galangan kapal

#### d. Galangan Kapal

Galangan kapal adalah alat untuk mengangkat bagian kapal dari permukaan laut. Galangan kapal dibuat berbentuk U sehingga bagian dalamnya berongga dan memiliki kerapatan yang kecil. Galangan saat berada di dalam air laut berisi air laut sehingga tenggelam dan kapal bisa masuk. Setelah kapal masuk maka air laut dalam galangan kapal dikeluarkan sehingga berat galangan berkurang dan kerapatannya mengecil sehingga dapat naik mengangkat kapal.

#### e. Balon Udara

Udara dapat digolongkan sebagai fluida, udara juga memiliki gaya apung pada benda. Gaya apung yang bekerja pada benda sama dengan berat udara yang dipindahkan oleh benda. Sama seperti dalam cairan dengan menggantikan kerapatan cairan dengan kerapatan udara.



Sumber : [internet.www.nonemigas.com](http://internet.www.nonemigas.com).

Gambar 7.13 Balon udara

Agar sebuah balon udara dapat naik, maka balon dibuat ringan atau kerapatannya dibuat lebih kecil daripada kerapatan udara. Caranya adalah dengan mengisi balon udara dengan gas panas. Gas panas memiliki kerapatan yang lebih kecil daripada kerapatan udara. Balon udara diisi dengan gas panas sehingga volumenya membesar. Volume yang semakin besar maka volume udara yang dipindah juga semakin besar sehingga gaya apung akan semakin besar. Bila gaya apung lebih besar daripada berat balon maka balon akan naik.

Balon dipompa terus sampai pada ketinggian tertentu, setelah dicapai ketinggian tertentu maka awak balon mengurangi gas panas dan berusaha mempertahankan sedemikian sehingga gaya apungnya tetap sama dengan berat balon sehingga balon melayang di udara. Saat awak balon ingin menurunkan balon udara, sebagian isi gas panas dikeluarkan sehingga volume balon berkurang yang

mengakibatkan gaya apung juga berkurang. Balon udara akan turun karena gaya apung lebih kecil dari berat balon.

Ada sedikit perbedaan antara balon udara dengan benda yang mengapung di dalam cairan. Pada balon, udara seluruh balon berada dalam fluida (dalam hal ini udara). Volume udara yang dipindahkan selalu sama dengan volume balon udara. Sedangkan benda yang terapung dalam cairan, hanya sebagian yang tercelup dalam cairan.



### Wawasan Kewirausahaan : Daya Saing

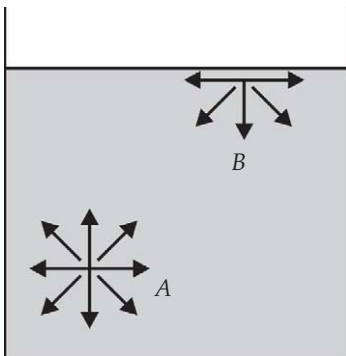
Kalian sekarang sudah mengetahui bagaimana sebuah benda dapat mengapung, tenggelam, dan melayang. Jika terjadi banjir bagaimana cara kalian agar tidak tenggelam? Kalian menaiki barang-barang yang dapat mengapung dan memperkirakan berat maksimum yang bisa diangkut tanpa tenggelam. Carilah barang-barang yang ada di sekitar kalian yang mudah diperoleh untuk kalian manfaatkan jika terjadi banjir.

## B. Tegangan Permukaan

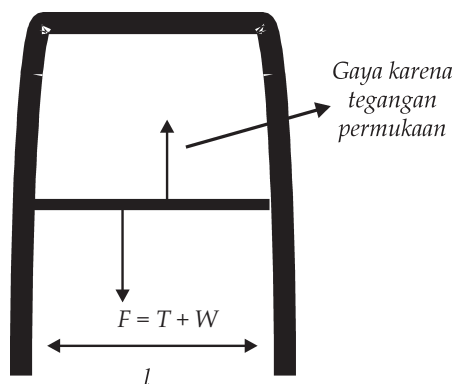
Pernahkah kalian mengamati mengapa jarum dan serangga dapat mengapung pada permukaan air. Pada pagi hari amati permukaan daun, kalian akan melihat butiran-butiran air di atasnya. Pernahkah kalian meneteskan air dari pipet secara perlahan-lahan? Bagaimana bentuk tetesan air?

Gejala-gejala di atas dapat dijelaskan dengan apa yang disebut tegangan permukaan. Tinjaulah sebuah molekul cairan yang berada di permukaan cairan dan sebuah molekul yang berada di dalam cairan.

Molekul yang berada di dalam cairan dikelilingi oleh molekul-molekul yang lain, di atasnya, di bawahnya, dan di sampingnya. Sedangkan molekul yang di permukaan hanya dikelilingi partikel yang di samping dan di bawahnya. Molekul dalam cairan akan mendapat tarikan dari molekul di sekelilingnya ke segala arah sehingga



**Gambar 17.14** Molekul di permukaan (B) hanya mendapat tarikan dari molekul di bawahnya dan kiri kanan molekul. Molekul di dalam cairan (A) mendapat tarikan dari molekul di atasnya, di bawahnya dan di kiri-kanannya.



**Gambar 7.15** Sebuah kawat berbentuk U, di kaki-kakinya terdapat kawat kedua yang bebas bergerak yang panjangnya  $l$ . Setelah dimasukkan sabun, kawat kedua akan bergerak ke atas. Agar kawat tidak bergerak ke atas kita harus mengerahkan gaya sedemikian sehingga gaya kita ditambah gaya gravitasi sama dengan gaya karena tegangan permukaan.

resultan gayanya adalah nol. Molekul yang di permukaan mendapat tarikan dari molekul di sampingnya dan di bawahnya, sehingga resultan gayanya tidak nol. Jika molekul dinaikkan sedikit maka molekul akan mendapatkan tarikan ke bawah. Jika molekul ditekan sedikit molekul di sekelilingnya akan menariknya ke atas. Gaya tarik antar-molekul tadi membuat permukaan cairan seperti selaput yang elastis.

Lihatlah Gambar (7.15), seutas kawat dibelokkan sehingga berbentuk U, kemudian kawat kedua dikaitkan sedemikian sehingga dapat meluncur pada kaki-kaki kawat U. Jika kawat U ini dicelupkan dalam larutan sabun

kemudian diangkat, kawat kedua akan tertarik ke atas. Agar kawat ini tidak terus bergerak ke atas, kita harus mengerahkan gaya pada kawat dengan arah ke bawah yang besarnya sama dengan gaya ke atas. Misalkan, gaya yang kita kerahkan adalah  $T$ , maka besar gaya ke bawah adalah gaya  $T$  ditambah berat kawat,  $W$ . Sehingga resultan gaya pada kawat dapat kita tuliskan:

$$F = T + W \quad \dots \quad (20)$$

$F$  adalah gaya yang menyebabkan kawat kedua naik ke atas. Gaya ini adalah gaya tegangan permukaan. Misalkan, panjang kawat kedua adalah  $l$ , larutan sabun yang mengenai kawat kedua memiliki dua permukaan sehingga gaya permukaan bekerja sepanjang  $2l$ . Gaya  $F$  yang bekerja pada kawat sebanding dengan panjang permukaan. Kita bisa menuliskannya sebagai:

$$F = \gamma d \quad \dots \quad (21)$$

$\gamma$  adalah koefisien tegangan permukaan,  $d$  adalah panjang permukaan,  $F$  adalah gaya tegangan permukaan. Pada contoh ini panjang permukaan adalah  $2l$  sehingga kita bisa menuliskan:



$$\gamma = \frac{F}{2l} \quad \dots \quad (22)$$



Sumber : internet.http. static.flickr.com

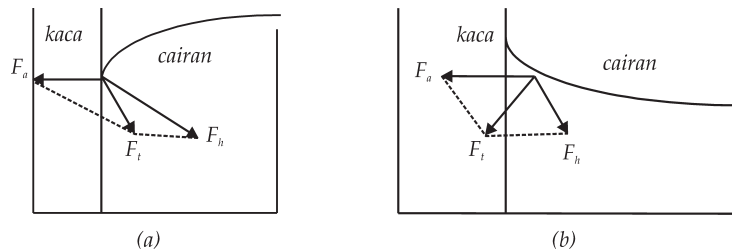
**Gambar 7.16** Titik-titik air di atas daun

Tegangan permukaan inilah yang menyebabkan tetes-tetes cairan cenderung berbentuk bola. Saat tetesan terbentuk, tegangan permukaan berusaha meminimalkan luas permukaannya sehingga permukaannya tertarik dan membentuk bola. Tegangan permukaan ini juga yang menyebabkan serangga dan benda-benda ringan tidak tenggelam, titik-titik air di daun cenderung untuk membulat, dan daun teratai dapat terapung di permukaan air danau.

## 1. Kapilaritas

Sekarang kita meninjau pengaruh tegangan permukaan pada pipa kapiler. Bila gaya tarik menarik antara molekul yang sejenis disebut kohesi, maka gaya tarik antara molekul yang tidak sejenis disebut adhesi. Salah satu contoh adhesi adalah gaya tarik antara cairan dengan dinding pipa kapiler. Pada pipa kapiler terdapat gaya kohesi yaitu antarmolekul cairan yang membentuk tegangan permukaan dan gaya adhesi antara cairan dengan dinding pipa.

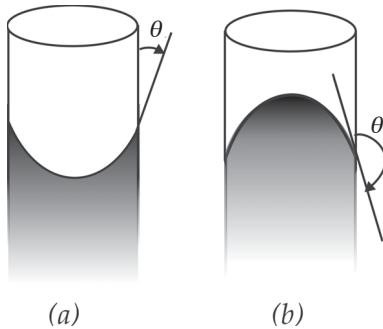
Bila gaya kohesi cairan lebih besar dari adhesi maka cairan tidak akan membasahi dinding cairannya. Mari kita tinjau arah resultan gaya seperti yang ditunjukkan Gambar (7.17a). Gaya kohesi lebih besar dari adhesi sehingga resultan gaya mengarah ke dalam cairan. Permukaan akan melengkung ke bawah. Kelengkungan permukaan zat cair kita namakan meniskus. Permukaan air dalam tabung kita sebut meniskus cembung.



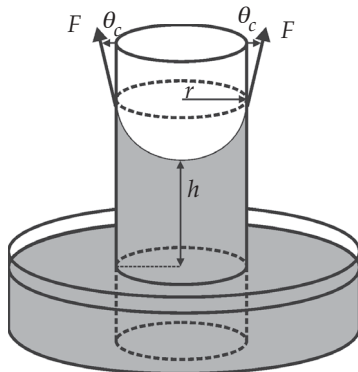
**Gambar 7.17** Kelengkungan dan arah gaya pada tabung dengan (a). Kohesi cairan lebih besar dari adhesi, terbentuk kelengkungan cembung (b). Kohesi cairan lebih kecil dari adhesi, terbentuk kelengkungan cekung.

Bila gaya adesi lebih besar dari gaya kohesi maka resultan gaya akan mengarah ke tabung sehingga membentuk kelengkungan ke bawah atau terjadi meniskus cekung dan cairan membasahi dinding tabung. Hal ini bisa dilihat pada Gambar (7.17a).

## 2. Sudut kontak



**Gambar 7.18** (a) cairan pada pipa kapiler yang memiliki gaya adesi lebih besar dari kohesi membentuk kelengkungan cekung dan sudut kontak yang terbentuk berupa sudut lancip. (b) cairan yang memiliki gaya kohesi lebih besar dari adesi membentuk kelengkungan cembung dan sudut kontak berupa sudut tumpul.



**Gambar 7.19** Adesi air lebih besar dari kohesi, komponen vertikal gaya tegangan permukaan menyebabkan air naik dalam pipa kapiler. Air akan berhenti naik bila tegangan permukaan dapat diimbangi berat air yang naik.

Bila kita tarik garis lurus pada kelengkungan zat cair, maka garis ini akan membentuk sudut terhadap dinding vertikal. Sudut ini dinamakan sudut *kontak*. Untuk pipa kapiler yang berisi zat cair yang permukaannya cekung misalnya air, maka sudut kontak berupa sudut lancip (kurang dari  $90^\circ$ ). Sedangkan cairan yang memiliki permukaan cembung, misalnya air raksa membentuk sudut tumpul ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ). Hal ini dapat dilihat pada Gambar (7.18).

Bagaimana dengan tegangan permukaannya? Tinjau jika sudut kontak lebih kecil dari  $90^\circ$ , maka kita bisa melihat gaya tegangan permukaan untuk zat cair yang adesinya lebih besar dari kohesinya memiliki komponen yang arahnya ke atas sehingga cairan akan naik ke atas. Cairan akan berhenti naik bila besarnya gaya tegangan permukaan sudah dapat diimbangi oleh berat zat cair yang naik ke atas. Saat cairan berhenti naik maka resultan gayanya:

$$F_g - F_t = 0 \quad \dots (23)$$

$F_g$  adalah berat zat cair yang naik  
 $F_g = mg = \rho Vg = \rho Ahg$ .  $A$  adalah luas penampang tabung  $= \pi r^2$ ,  $h$  adalah tinggi kolom zat cair.  $F_t$  adalah komponen tegangan permukaan ke arah atas. Besarnya gaya tegangan permukaan adalah keliling tabung dikalikan koefisien tegangan permukaan cairan.



$$F_t = 2\pi r \gamma \quad \dots \quad (24)$$

sehingga persamaan (23) dapat kita tuliskan menjadi:

$$\begin{aligned} F_g &= F_t \cos \theta \\ \rho g h (\pi r^2) &= 2\pi r \gamma \cos \theta \end{aligned}$$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r g \rho} \quad \dots \quad (25)$$



### Contoh Soal 9

Berapa tinggi air yang naik dalam pipa yang jari-jarinya 0,15 mm jika sudut kontak nol?  $\gamma$  untuk air adalah 0,073.

**Penyesuaian :**

*Diketahui :*

$$r = 0,15 \text{ mm} = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}, \quad \rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

*Jawab :*

Ketinggian air  $h$  adalah:

$$\begin{aligned} h &= \frac{2 (0,073 \text{ m}) \cos 0}{(1.000 \text{ kg/m}^3) (1,5 \times 10^{-4} \text{ m}) (9,8 \text{ N/kg})} \\ &= 9,93 \times 10^{-2} \text{ m} = 9,93 \text{ cm} \end{aligned}$$

Jadi, tinggi air dalam pipa = 9,93 cm



### Contoh Soal 10

Tegangan permukaan air raksa adalah 0,465 N/m. Sudut kontak air raksa dengan pipa kapiler berjari-jari 2,5 mm pada mangkuk sebesar  $150^\circ$ . Berapa ketinggian air raksa relatif terhadap permukaan air raksa dalam mangkuk?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$r = 2,5 \text{ mm}, \quad \gamma = 0,465 \text{ N/m}, \quad \theta = 150,$$

Jawab :

$$h = \frac{2(0,465 \text{ m}) \cos 150}{(13600 \text{ kg/m}^3)(1,5 \times 10^{-4} \text{ m})(9,8 \text{ N/kg})}$$
$$= -4,03 \times 10^{-2} \text{ m} = -4,03 \text{ cm}$$

Jadi, ketinggian air raksa negatif, atau ketinggian air raksa dalam pipa kapiler di bawah permukaan air raksa di mangkuk.

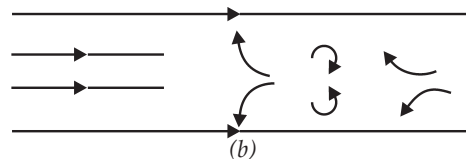
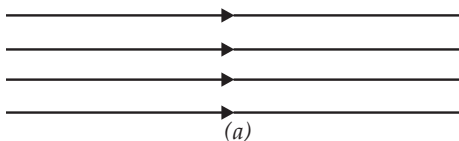


### Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Kalian pasti sering melihat tembok yang basah karena menyerap air yang ada di fondasi bangunan. Tembok jadi kotor. Hal ini karena adanya gaya kapiler. Apakah gaya kapiler bisa dimanfaatkan untuk kehidupan manusia? Jika ya, berilah contohnya!

## C. Fluida Bergerak

Pada subbab sebelumnya kita telah mempelajari sifat statik zat cair. Sekarang kita akan mempelajari sifat cairan yang bergerak. Pernahkah kalian melihat asap rokok yang keluar dari rokok? Mula-mula asap keluar dengan bentuk teratur, lama kelamaan bentuk asap menjadi tidak teratur. Aliran yang teratur kita namakan sebagai *aliran laminar*. Aliran laminar mempunyai garis alir berlapis. Sedang aliran yang tidak teratur kita sebut *aliran turbulen*. Contoh aliran turbulen adalah aliran sungai saat banjir. Contoh lain aliran laminar adalah aliran air sungai saat jernih. Kalian akan melihat aliran air seragam mengikuti aliran sungai. Sedang pada saat banjir kalian bisa melihat ada bagian air yang ke atas, ke bawah atau pun mengikuti aliran sungai. Kita akan membahas aliran fluida yang laminar.



**Gambar 7.20** (a) Aliran laminar mengikuti garis-garis lurus atau lengkung yang searah. (b) Aliran turbulen tampak ada aliran yang melingkar. Pada aliran turbulen arah gerak partikel air ada yang berbeda dengan arah keseluruhan aliran.

Kita akan mempelajari aliran fluida atau cairan yang ideal, yaitu yang memenuhi sifat-sifat sebagai berikut.

1. Fluida mengalir tanpa ada gaya gesek. Dengan demikian tenaga mekanik cairan tetap, tidak ada yang hilang karena gesekan. Fluida seperti ini kita sebut fluida yang non viskos. Pada fluida yang viskos atau kental kita tidak bisa mengabaikan gesekan antarmolekul fluida.
2. Fluida tidak termampatkan. Pada fluida yang tidak termampatkan kerapatan fluida konstan di seluruh fluida, meskipun fluida mendapat tekanan. Pada umumnya kerapatan fluida akan berubah karena adanya perubahan volume bila mendapat tekanan. Akan tetapi pada keadaan tertentu kita dapat menganggap fluida tidak termampatkan.
3. Fluida mengalir dengan aliran tunak (*steady state*). Fluida mengalir dengan kecepatan konstan.

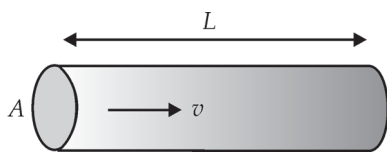
## 1. Persamaan Kontinuitas

Kita sering mendengar istilah debit air. Misalnya debit air PAM menurun di musim kemarau. Apakah yang dimaksud dengan debit? Debit adalah besaran yang menyatakan banyaknya air yang mengalir selama 1 detik yang melewati suatu penampang luas. Ambillah sebuah selang dan nyalakan kran, air akan mengalir melalui penampang ujung selang itu. Jika selama 5 detik air yang mengalir adalah lewat ujung selang adalah  $10 \text{ m}^3$ , maka kita katakan debit air adalah  $\frac{10}{5} \text{ m}^3/\text{detik} = 2 \text{ m}^3/\text{det.}$

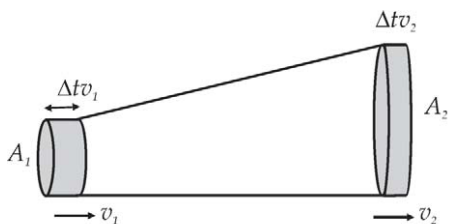
$$\text{Debit} = \frac{\text{volume fluida}}{\text{waktu}} \quad \dots \quad (26)$$

Mari kita tinjau aliran fluida yang melalui pipa yang panjangnya  $L$  dengan kecepatan  $v$ . Luas penampang pipa adalah  $A$ . Selama  $t$  detik volume fluida yang mengalir adalah  $V = AL$ , sedang jarak  $L$  ditempuh selama  $t = L/v$  detik maka debit air adalah:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{AL}{L/v} = Av \quad \dots \quad (27)$$



**Gambar 7.21** Pipa panjang luas penampang pipa  $A$ , panjang pipa  $L$ . Fluida mengalir dengan kecepatan  $v$ . Selama waktu  $t$  maka volume fluida mengalir lewat pipa sebanyak  $V$ . Debit fluida adalah  $Q = Av$ .



**Gambar 7.22** Fluida mengalir melalui pipa masuk dari luasan  $A_1$  keluar di ujung satunya yang luasnya  $A_2$ . Daerah yang berbayang-bayang memiliki volume yang sama.

Debit merupakan laju aliran volume.

Sebuah pipa dialiri air. Perhatikan kecepatan air yang mengalir. Tutuplah sebagian permukaan selang dengan jari. Bagaimana kecepatan air? Mana yang lebih deras saat permukaan selang tidak ditutup atau saat ditutup? Kita akan melihat mengapa demikian.

Tinjau fluida yang mengalir di dalam pipa dengan luas penampang ujung-ujung pipa berbeda. Fluida mengalir dari kiri masuk ke pipa dan keluar melalui penampang di sebelah kanan seperti ditunjukkan Gambar (7.22).

Air memasuki pipa dengan kecepatan  $v_1$ . Volume air yang masuk dalam selang waktu  $\Delta t$  adalah:

$$V = A_1 v_1 \Delta t \quad \dots \quad (28)$$

Fluida tak termampatkan, dengan demikian bila ada  $V_1$  volume air yang masuk pipa, sejumlah volume yang sama akan keluar dari pipa. Luas penampang ujung pipa yang lain adalah  $A_2$ .

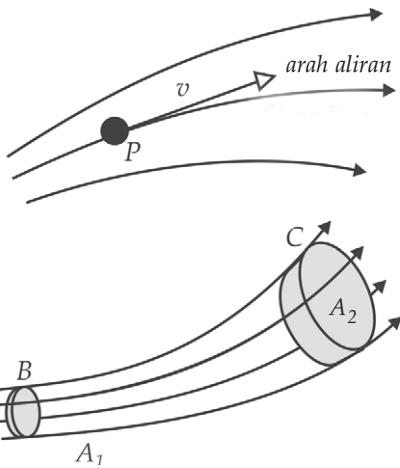
$$V = A_2 v_2 \Delta t \quad \dots \quad (29)$$

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t \quad \dots \quad (30)$$

Dengan demikian:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{konstan} \quad \dots \quad (31)$$

Persamaan ini disebut *persamaan kontinuitas*. Debit yang masuk pada suatu penampang luasan sama dengan debit yang keluar pada luasan yang lain meskipun luas penampangnya berbeda.



Aliran air dalam pipa yang berbeda penampangnya dapat kita gambarkan sebagai berikut (Gambar 7.23). Di tempat yang penampangnya luas, maka aliran air kurang rapat dibanding bila melewati penampang yang lebih kecil.

Gambar 7.23 Aliran air dalam fluida



### Contoh Soal 11

Air mengalir dalam pipa yang jari-jari 5 cm dengan laju 10 cm/det. Berapa laju aliran volumenya?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$r = 0,05 \text{ cm}, \quad v = 10 \text{ cm/det}$$

*Jawab :*

$$Q = v A$$

$$= (10)\pi (0,05)^2$$

$$= 0,25\pi \text{ cm}^3/\text{det}$$



### Contoh Soal 12

Fluida mengalir dalam pipa yang diameternya berbeda-beda, kelajuan air di titik A yang jari-jarinya 3 cm adalah 8 m/det, berapakah kelajuan air di titik B, dan C bila jari jari masing-masing 1 cm dan 5 cm.

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$A_C = \pi(0,03 \text{ m})^2, \quad A_B = \pi(0,01 \text{ m})^2, \quad A_C = \pi(0,05 \text{ cm})^2$$

*Jawab :*

Debit air di ketiga titik tersebut sama maka:

$$Q = v_A A_A = v_B A_B = v_C A_C$$

$$v_B = \frac{Q}{A_B} = \frac{(8 \text{ m/det}) \pi (0,03 \text{ m})^2}{\pi (0,01 \text{ m})^2} = 72 \text{ m/det}$$

$$v_C = \frac{Q}{A_C} = \frac{(8 \text{ m/det}) \pi (0,03 \text{ m})^2}{\pi (0,05 \text{ m})^2} = 2,88 \text{ m/det}$$



### Contoh Soal 13

Suatu air terjun dengan ketinggian 10 m mengalirkan air dengan debit  $20 \text{ m}^3/\text{det}$ . Berapa daya yang dapat dibangkitkan oleh air terjun itu.  
 $\rho_{\text{air}} = 1.000 \text{ kg/det}$ .

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

Kita tinjau di puncak air terjun massa air memiliki tenaga potensial yang besarnya:

$$E_p = mgh$$

Massa air adalah  $\rho V$

Daya yang dibangkitkan merupakan perubahan tenaga potensial air menjadi tenaga untuk penggerak turbin di bawahnya.

$$P = \frac{mgh}{t} = \frac{\rho Vgh}{t} = \frac{V}{t} \rho gh$$

$$P = Q\rho gh$$

Dengan demikian kita dapat menghitung daya yang ditimbulkan oleh air terjun.

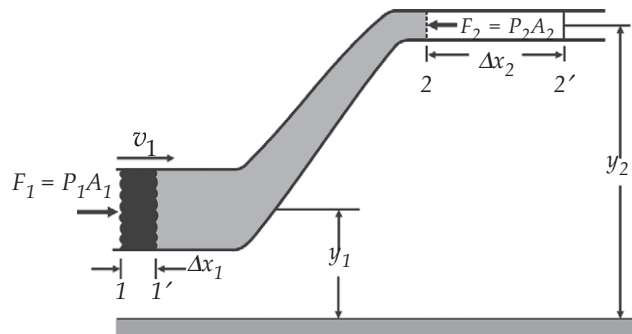
$$P = 20 \times 1.000 \times 10 \times 10$$

$$P = 2 \times 10^6 \text{ Watt}$$

Saat mempelajari fluida statik, kita mengetahui bahwa tekanan dalam fluida pada kedalaman yang sama, besarnya sama. Kita mengenal asas bejana berhubungan. Apakah asas ini juga berlaku untuk fluida yang mengalir? Apakah pada fluida yang mengalir tekanan pada tempat dan kedalaman sama hasilnya juga sama? Kita dapat mengetahuinya setelah kita mengenal hukum fluida yang bergerak atau hukum Bernoulli.

## 2. Asas dan Rumus Bernoulli

Kita mempelajari laju aliran volume dan mengabaikan ketinggian pipa. Bagaimana jika fluida mengalir dalam pipa yang ketinggiannya dan luas penampang alirannya sembarang? Tinjau pipa pada Gambar (7.24).



Gambar 7.24 Hukum Bernoulli

Di ujung pipa satu, mengalir air dengan volume  $\Delta V$ , bila kerapatan air adalah  $\rho$  maka massa pada volume tersebut adalah  $\Delta m = \Delta V\rho$ . Tenaga potensial yang dimiliki massa adalah  $U = \Delta mgh$ . Fluida tak termampatkan maka pada ujung yang lainnya keluar air dengan volume yang sama dan massa yang sama. Ujung kedua memiliki ketinggian yang berbeda dengan ujung pertama. Dengan demikian, tenaga potensialnya berbeda meskipun massanya sama. Jika massa  $\Delta m$  bergerak dari ujung 1 ke ujung 2 maka massa mengalami perubahan tenaga potensial sebesar,

$$\Delta U = \Delta mgh_2 - \Delta mgh_1 = \rho\Delta V (h_2 - h_1) \quad \dots \quad (33)$$

Perubahan tenaga kinetik massa:

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) \quad \dots \quad (34)$$

Saat fluida di ujung kiri fluida mendapat tekanan  $P_1$  dari fluida di sebelah kirinya, gaya yang diberikan oleh fluida di sebelah kirinya adalah  $F_1 = P_1 A_1$ . Kerja yang dilakukan oleh gaya ini adalah:

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 V \quad \dots \quad (35)$$

Pada saat yang sama fluida di bagian kanan memberi tekanan kepada fluida ke arah kiri. Besarnya gaya karena tekanan ini adalah  $F_2 = -P_2 A_2$ . Kerja yang dilakukan gaya ini.

$$W_2 = F_2 \Delta x_2 = P_2 A_2 \Delta x_2 = P_2 V \quad \dots \quad (36)$$

Kerja total yang dilakukan gaya di sebelah kiri dan sebelah kanan ini adalah:

$$W_{total} = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = P_1 - P_2 V \quad \dots \quad (37)$$

Masih ingatkah dengan teorema kerja dan energi:

$$W_{total} = \Delta U + \Delta K \quad \dots \quad (38)$$

Kita telah mengetahui perubahan tenaga potensial dan tenaga kinetiknya dari persamaan (33) dan (34), dengan memasukkannya ke persamaan (38) kita mendapatkan:

$$W_{total} = (P_1 - P_2) \Delta V = \rho \Delta V g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

kita bagi kedua ruas dengan  $\Delta V$  kita memperoleh:

$$(P_1 - P_2) = \rho g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

kita bisa mengubah persamaan tersebut menjadi:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \dots \quad (39)$$



Persamaan di atas dapat kita tuliskan sebagai:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konstan} \quad \dots \quad (40)$$

Persamaan (40) adalah persamaan Bernoulli.

Persamaan tersebut menunjukkan besaran tersebut memiliki nilai yang sama di setiap tempat pada pipa. Suku  $\rho gh$  menunjukkan energi potensial, suku  $\frac{1}{2} \rho v^2$  menunjukkan energi kinetik.

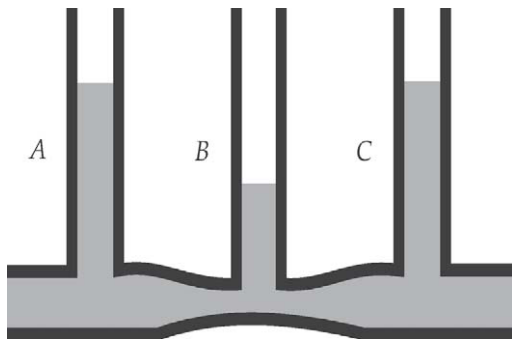
Contoh penggunaan Persamaan Bernoulli

Berdasarkan hukum hidrostatis, tekanan pada setiap titik pada kedalaman yang sama adalah sama. Ternyata hal ini tidak berlaku pada zat cair yang mengalir. Dalam zat cair yang bergerak melalui pipa dengan diameter yang sama pada sepanjang pipa ternyata tekanannya berbeda. Gambar 7.24 menunjukkan tekanan semakin mengecil pada jarak yang semakin jauh. Mengapa demikian? Hal ini disebabkan kecepatan air semakin besar. Pada kecepatan yang besar tekanannya lebih kecil daripada tekanan pada aliran kecepatan yang rendah. Jadi, tekanan di tempat yang paling dekat dengan permulaan air semakin besar. Jika air dari sumber air dialirkan ke rumah-rumah melalui pipa, tekanannya akan semakin berkurang. Sebuah pipa yang memiliki diameter berbeda-beda, bagaimana kecepatan pada tiap diameter? Berapa tekanan pada tiap diameter?

Pada gambar 7.25 fluida bergerak dari titik A ke titik B kemudian ke titik C. Ketinggian pipa di ketiga titik bisa kita anggap sama,  $h_1 = h_2$  sehingga kita bisa menggunakan persamaan Bernoulli dengan meninjau titik A dan titik B. Persamaan Bernoulli menjadi berbentuk:

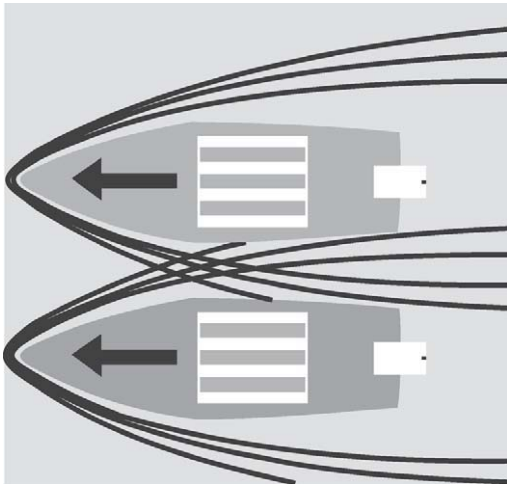
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \dots \quad (41)$$

Kecepatan di A lebih kecil daripada kecepatan di titik B, atau  $v_1 < v_2$ , karena luas penampang di A lebih besar daripada di B, maka tekanan di titik A lebih besar daripada di B. Demikian juga bila kita lihat titik B dan titik C. Kecepatan di titik B lebih besar dari pada kecepatan di titik C sehingga tekanan di titik B lebih kecil dari tekanan di titik C. Akibatnya permukaan air di atas titik B lebih rendah dari pada ketinggian permukaan air di atas titik C.



Sumber : Penerbit

**Gambar 7.25** Pipa dengan berbagai diameter. Di titik A kelajuan air  $V_1$ , di titik B kelajuan air  $V_2$ . Kelajuan di titik A lebih kecil daripada di titik B, tekanan di titik A lebih besar dari titik B. Kelajuan di titik B lebih besar dari kelajuan di titik C. Tekanan di titik B lebih besar dari tekanan di titik C.



Sumber : Penerbit

**Gambar 7.26** Perahu yang berdekatan yang bergerak cepat dan sejajar dapat saling bertabrakan

Apabila kelajuan bertambah maka tekanan akan berkurang. Sekarang kalian dapat memahami mengapa permukaan air di tabung A lebih tinggi dan permukaan air di tabung B paling rendah. Hal itu disebabkan tekanan di titik A paling besar dan tekanan di titik B paling kecil.

Hukum Bernoulli juga menjelaskan mengapa 2 perahu motor berdekatan yang bergerak cepat dan sejajar cenderung saling mendekat dan bertabrakan. Pada waktu kedua perahu bergerak ke depan, air di antara keduanya tersalurkan pada daerah yang sempit sehingga kecepatan relatif perahu dan air relatif lebih besar di tempat yang sempit ini dibandingkan dengan di tempat yang lebih luas. Akibatnya tekanan air di kedua sisi perahu yang berdekatan berkurang dan menjadi lebih kecil daripada tekanan di sisi-sisi luar kedua perahu sehingga kedua perahu terdorong mendekat.

Contoh di atas merupakan salah satu terapan untuk ketinggian yang sama. Bagaimana kalau terdapat dua titik dengan ketinggian berbeda tetapi kecepatan di kedua titik adalah nol  $v_1 = v_2 = 0$  atau fluida tidak bergerak.

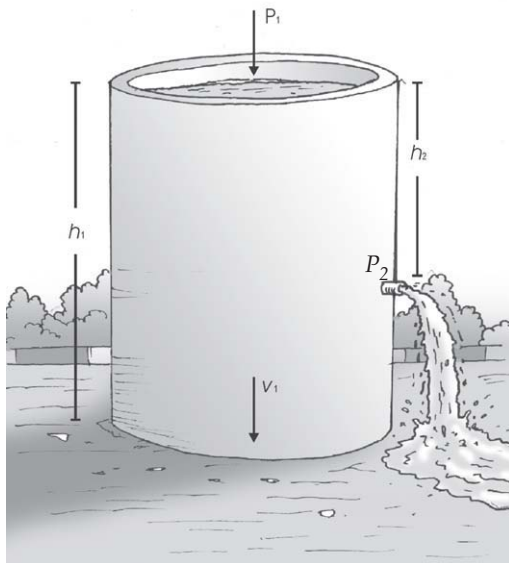
$$P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho gh_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho gh_2 - \rho gh_1 = \rho gh$$

Kita mendapatkan persamaan untuk tekanan hidrostatika.  $h$  adalah selisih ketinggian. Bila  $P_1$  adalah tekanan di dalam zat cair,  $h_1$  adalah kedalaman dan  $h_2$  adalah permukaan air = 0, serta  $P_2$  adalah tekanan di permukaan  $P_0$ , kita mendapatkan persamaan (9).

Apabila sebuah bak penyimpanan air memiliki keran kecil di bagian bawahnya. Bila ketinggian air di bak adalah  $h$  dari keran, berapakah kelajuan di keran?

Kita bisa menyelesaikan masalah di atas dengan menggunakan persamaan Bernoulli.



Sumber : Penerbit

**Gambar 7.27** Bak penyimpanan air dapat digunakan untuk melakukan percobaan Bernoulli.

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

nilai  $h_1 = y_a$ ,  $h_2 = y_b$ . Tekanan  $P_1$  sama dengan tekanan  $P_2$  sama dengan tekanan udara luar, sehingga  $P_1$  dan  $P_2$  saling menghilangkan. Luas penampang keran jauh lebih kecil daripada luas penampang bak penampungan, sehingga kita dapat mengabaikan kecepatan air di permukaan bak penampungan. Dengan demikian persamaan Bernoulli menjadi:

$$\rho g y_a = \rho g y_b + \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

$$g y_a = g y_b + \frac{1}{2} v_b^2$$

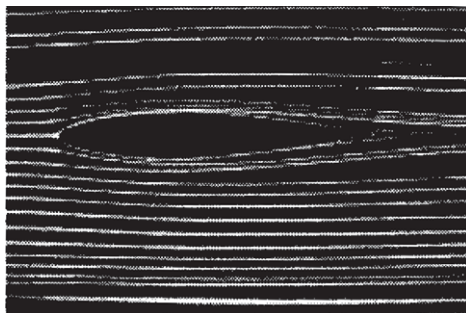
$$y_a - y_b = h = \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Kelajuan air di keran adalah:

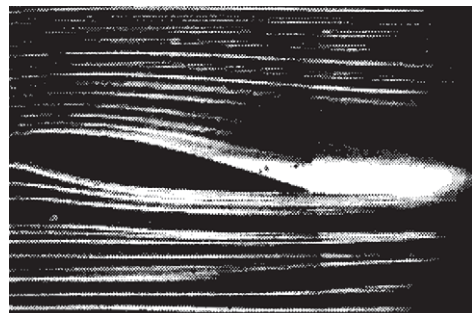
$$v_b = \sqrt{2gh}$$

Kita dapat melihat bahwa kelajuan air pada keran yang terletak pada jarak  $h$  dari permukaan atas penampungan air sama dengan kelajuan air jika ia jatuh bebas dari ketinggian  $h$ . Ini disebut sebagai *Hukum Toricelli*.

Penerapan Hukum Bernoulli. Banyak hal yang bisa diterangkan dengan menggunakan persamaan Bernoulli. Tahukah kalian apa yang menyebabkan pesawat dapat terbang? Pesawat dirancang dengan bentuk seperti pada Gambar (7.28).



(a)



(b)

Sumber : [www.aero.com](http://www.aero.com)

**Gambar 7.28** Sayap pesawat dirancang agar aliran udara menimbulkan daya angkat. Jika sayap dibuat mendatar tekanan udara di atas sama dengan tekanan di bawah sayap. Jika sayap dibuat ujung agak terangkat kecepatan udara di atas sayap lebih besar dari di bawah sehingga tekanan di bawah lebih besar daripada tekanan di atas sehingga timbul daya angkat pada sayap pesawat.



Sumber : [www.beasystem.com](http://www.beasystem.com)

**Gambar 7.29** Daya angkat sayap pesawat ditimbulkan karena perbedaan tekanan udara di atas dan di bawah sayap.

Sayap pesawat cukup tipis sehingga bisa kita anggap bagian atas sayap berada pada ketinggian yang sama dengan bagian bawah pesawat. Dengan menggunakan persamaan (41).

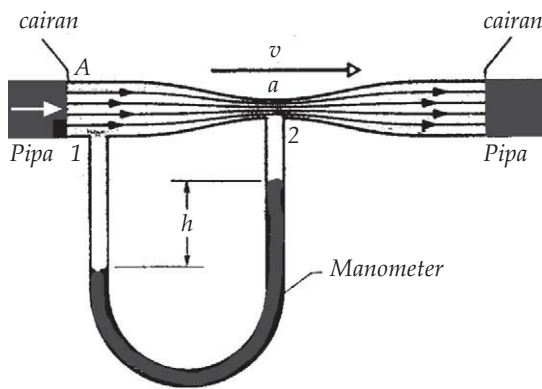
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$P_1$  adalah bagian atas pesawat  $P_2$  bagian bawah pesawat. Bila  $v_1 > v_2$  maka  $P_1 < P_2$ , akibatnya pesawat terangkat ke atas.

Bagaimana prinsip kerja alat pengukur Venturi?

Gambar venturimeter seperti ditunjukkan pada gambar (7.30)

Suatu cairan yang massa jenisnya  $\rho$  mengalir melalui sebuah pipa yang luas penampangnya  $A$ . Di bagian yang menyempit luas menjadi  $a$ , dipasang sebuah manometer pipa. Jika cairan manometer memiliki massa jenis  $\rho'$ , maka dengan menggunakan persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas di titik 1 dan titik 2.



**Gambar 7.30** Venturimeter

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_2$$

$$v_1 A = v_2 a$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{v_1 A}{a} \right)^2 + P_2$$

Dengan menggunakan persamaan hidrostatika pada manometer.

$$P_1 + \rho h = P_2 + \rho' h$$

$$P_1 - P_2 = \rho' h - \rho h$$

Bila kita masukkan selisih tekanan tersebut pada persamaan Bernoulli kita dapatkan:

$$v_1^2 \left( \frac{1}{2} \rho - \frac{1}{2} \rho \left( \frac{A}{a} \right)^2 \right) = P_2 - P_1 = \rho h - \rho' h$$

$$v_1^2 = \frac{a^2 2(\rho' - \rho) h}{A^2 - a^2}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{a^2 2(\rho' - \rho)h}{A^2 - a^2}}$$

Kita bisa mengetahui kecepatan udara dengan mengetahui kerapatan udara, kerapatan cairan dalam manometer, dan selisih ketinggian manometer.

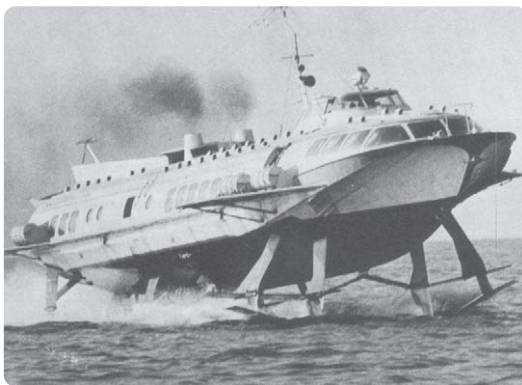
### **Hidrofoil**

Sayap kapal hidrofoil ini disebut foil yang berarti sayap air. Sayap ini sama dengan sayap udara pesawat terbang. Sayap air melekat pada topangan ruang membentang ke bawah dari lambung kapal. Ada 2 pasang foil, sepasang foil diletakkan di pusat gravitasi kapal dan sepasang foil lainnya diletakkan dekat bagian belakang kapal.

Apabila hidrofoil meluncur pada kecepatan rendah atau sedang, maka kapal akan beroperasi seperti kapal biasa, yaitu sebagian badan masuk ke dalam air. Sewaktu kapal meluncur dengan kecepatan tinggi, air akan membelok dari permukaan bagian atas foil, seperti udara membelok dari permukaan bagian atas sayap pesawat terbang. Tekanan air pada permukaan foil atas menurun dan tekanan yang berkurang akan menimbulkan gerak mengangkat. Semakin banyak gerak mengangkat maka haluan kapal muncul dari permukaan air, sehingga seluruh lambung kapal akan naik ke atas permukaan air. Beberapa jenis kapal hidrofoil memiliki foil yang selalu

berada di bawah air. Ada pula hidrofil lain yang sebagian terendam saat kapal meluncur. Jika kecepatan melambat, tekanan pada gerak mengangkat berkurang dan hidrofoil menjadi bergantung lagi pada air.

Tekanan air pada permukaan foil atas berkurang dan tekanan yang berkurang akan menimbulkan gerak mengangkat. Semakin banyak gerak mengangkat maka haluan kapal muncul dari permukaan air, sehingga seluruh lambung kapal akan naik ke atas permukaan air.



Sumber : [www.tibu.smugmug.com](http://www.tibu.smugmug.com)

**Gambar 7.31** Sayap pada hidrofil berfungsi untuk mengangkat badan kapal pada kecepatan yang tinggi sehingga gesekan antara kapal dengan air berkurang.

Kendaraan berbantalan udara memiliki mesin yang dirancang untuk beroperasi di atas bantalan udara pada ketinggian beberapa cm di atas permukaan tanah atau permukaan air. Bantalan udara dilengkapi dengan beberapa kipas dengan tenaga yang besar yang berputar pada sebuah poros vertikal dan diarahkan ke bawah. Agar kendaraan bergerak ke depan dan mengerem digerakkan baling-baling atau turbin yang dipasang horisontal. Beberapa jenis kendaraan berbantalan udara lainnya udara digerakkan oleh kipas-kipas melalui sisi-sisi kiri sehingga terjadi dorongan horisontal, pengereman, dan kekuatan pengontrol.



## Ringkasan

### 1. Kerapatan

Kerapatan atau massa jenis adalah perbandingan antara massa terhadap volumenya.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

satuan kerapatan adalah  $\text{kg/m}^3$ .

Kerapatan berat adalah berat persatuan volume atau dapat dituliskan sebagai:

$$\rho_g = \frac{mg}{V}$$

Massa jenis relatif adalah perbandingan antara massa jenis benda dengan massa jenis air dengan volume yang sama.

$$\rho_{\text{relatif}} = \frac{\rho_{\text{benda}}}{\rho_{\text{air}}}$$

### 2. Tekanan fluida

Adalah gaya persatuan luas:

$$P = \frac{F}{A}$$

satuan tekanan dalam Sistem Internasional adalah Newton persegi ( $\text{N/m}^2$ ) yang dinamakan Pascal (Pa).  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .

### 3. Modulus Bulk

Adalah perbandingan antara tekanan dengan perubahan volume persatuan volume mula-mula:

$$B = - \frac{P}{\Delta V / V}$$

### 4. Tekanan Hidrostatika

Tekanan hidrostatika di dalam fluida yang memiliki kerapatan  $\rho$  pada kedalaman  $h$  adalah:

$$P = P_0 + \rho gh_2$$

Hukum Pokok Hidrostatika : Titik-titik pada kedalaman yang sama memiliki tekanan yang sama.

Tekanan gauge merupakan tekanan yang ditunjukkan pada oleh alat ukur.

### 5. Hukum Pascal

Hukum Pascal : Tekanan yang diberikan pada suatu cairan yang tertutup diteruskan ke setiap titik dalam fluida dan ke dinding bejana.



6. Bunyi hukum Archimedes

Sebuah benda yang tenggelam seluruhnya atau pun sebagian dalam suatu fluida benda itu akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan.

Benda yang mengapung:

$$F_{\text{apung}} = F_{\text{berat}}$$

$$\rho_{\text{cairan}} > \rho_{\text{benda}} \text{ atau } \rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{fluida}}$$

Benda yang melayang:

$$F_{\text{apung}} = F_{\text{berat}}$$

$$\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{fluida}}$$

benda tenggelam:

$$F_{\text{berat}} > F_{\text{apung}}$$

$$\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{fluida}}$$

7. Tegangan permukaan:  $F = \gamma d$

8. Fluida bergerak

Fluida bergerak memenuhi persamaan bernoulli:

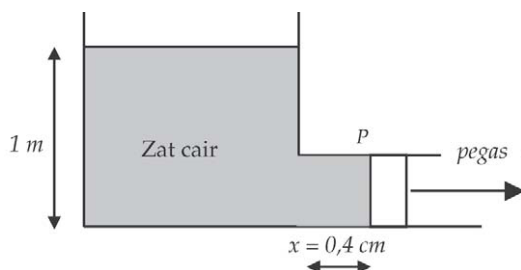
$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T}$$



## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!



1. Untuk menentukan massa jenis zat cair dirangkai alat seperti gambar di samping. Penghisap  $P$  dapat bergerak bebas dengan luas penampang  $1 \text{ cm}^2$ . Jika konstanta pegas  $100 \text{ N/m}$  dan pegas tertekan sejauh  $0,4 \text{ cm}$ , maka massa jenis zat cair adalah ....

A.  $400 \text{ kg/m}^3$

D.  $800 \text{ kg/m}^3$

B.  $500 \text{ kg/m}^3$

E.  $1.000 \text{ kg/m}^3$

C.  $750 \text{ kg/m}^3$

2. Sepotong kaca di udara memiliki berat  $25 \text{ N}$  dan massa jenis  $2,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Bila massa jenis air  $1.000 \text{ kg/m}^3$  dan percepatan gravitasinya  $10 \text{ m/det}^2$ , maka berat kaca di dalam air adalah ....

A.  $10 \text{ N}$

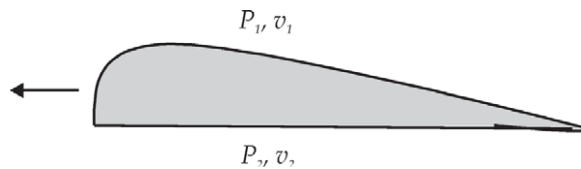
D.  $25 \text{ N}$

B.  $15 \text{ N}$

E.  $30 \text{ N}$

C.  $20 \text{ N}$

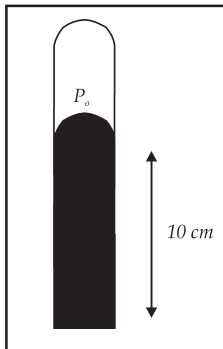
3. Penghisap sebuah pompa hidrolik memiliki luas sebesar  $A \text{ m}^2$ , hendak digunakan untuk mengangkat mobil yang beratnya  $WN$ . Gaya yang harus diberikan pada penghisap yang lainnya jika luas penampangnya  $A/5 \text{ m}^2$  adalah ....
- A.  $W/5 \text{ N}$       C.  $25 \text{ WN}$       E.  $W/10 \text{ N}$   
 B.  $10 \text{ WN}$       D.  $5 \text{ WN}$
4. Dari gambar di bawah  $P_1$  dan  $v_1$  adalah tekanan dan kecepatan udara di atas sayap.  $P_2$  dan  $v_2$  adalah tekanan dan kecepatan udara di bawah sayap. Agar sayap pesawat dapat mengangkat pesawat, maka syaratnya ....



- A.  $P_1 = P_2$  dan  $v_1 = v_2$       D.  $P_1 > P_2$  dan  $v_1 > v_2$   
 B.  $P_1 < P_2$  dan  $v_1 > v_2$       E.  $P_1 > P_2$  dan  $v_1 < v_2$   
 C.  $P_1 < P_2$  dan  $v_1 < v_2$
5. Sebuah cairan dimasukkan dalam sebuah cawan, kemudian sebuah pipa kapiler ditempatkan dalam cairan tersebut. Ternyata cairan di dalam pipa kapiler lebih tinggi dari pada permukaan cairan dalam cawan. Pernyataan yang benar di bawah ini adalah ....
- A. gaya adesi antara cairan dan pipa kapiler lebih besar dari gaya kohesi cairan  
 B. gaya adesi antara cairan dan pipa kapiler lebih kecil dari gaya kohesi cairan  
 C. gaya adesi antara cairan dan dinding cawan lebih besar dari gaya kohesi cairan  
 D. gaya adesi antara cairan dan dinding cawan lebih besar dari gaya kohesi cairan  
 E. gaya kohesi antara cairan dan pipa kapiler lebih besar dari gaya adhesi cairan



6. Sebuah kawat yang panjangnya 12 cm berada di permukaan air dengan panjangnya sejajar dengan permukaan. Koefisien tegangan permukaan air adalah 0,073 N/m. Gaya tambahan di luar berat kawat yang diperlukan untuk menarik kawat adalah ....
- 0,0087 N
  - 0,0175 N
  - 0,304 N
  - 0,608 N
  - 1,75 N
7. Seekor serangga air dapat berjalan di permukaan danau tanpa tenggelam. Hal ini disebabkan karena ....
- serangga air memiliki massa jenis lebih kecil dari massa jenis air
  - serangga air beratnya kecil
  - adanya tegangan permukaan air danau
  - gerakan serangga sangat cepat
  - serangga air memiliki massa jenis lebih besar daripada massa jenis air



8. Gambar di samping menunjukkan batang pipa kaca yang berisi udara. Ujung atas pipa tertutup sedangkan ujung bawahnya tertutup oleh raksa yang tingginya 10 cm. Tekanan udara luar 76 cmHg, maka tekanan udara di dalam pipa adalah ....
- 0 (nol)
  - 10 cmHg
  - 66 cmHg
  - 76 cmHg
  - 86 cmHg
9. Sebuah bola logam yang beratnya 200 N jika ditimbang di dalam air beratnya seakan-akan 160 gram. Jika ditimbang di dalam minyak yang massa jenisnya  $0,8 \text{ g/cm}^3$  berat bola logam adalah .... ( $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$ )
- 128 N
  - 158 N
  - 168 N
  - 200 N
  - 208 N

10. Suatu benda terapung di atas permukaan air yang berlapiskan minyak dengan 50% benda berada di dalam air, 30% di dalam minyak dan sisanya di atas permukaan minyak. Jika massa jenis minyak  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , maka massa jenis benda tersebut adalah .... (dalam  $\text{g/cm}^3$ )
- A. 0,62
  - B. 0,68
  - C. 0,74
  - D. 0,78
  - E. 0,82

**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

1. Air laut memiliki modulus Bulk  $2,3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ . Carilah kerapatan air laut pada kedalaman di mana tekanan sama dengan 800 atm jika kerapatan dipermukaan  $1024 \text{ kg/m}^3$ .
2. Sebuah mobil bermassa 1.500 kg diam di atas ban. Tiap-tiap ban dipompa pada tekanan gauge 200 kPa. Berapakah luas kontak tiap ban dengan jalan, dengan mengasumsikan keempat ban menopang beratnya secara sama besar?
3. Sebuah balok dari bahan yang tidak diketahui memiliki berat 5 N di udara dan 4,55 N bila tercelup dalam air. Berapakah kerapatan bahan?
4. Berapakah luas minimum dari sebuah balok es yang tebalnya 0,4 m yang mengapung di atas air yang akan menahan sebuah mobil yang beratnya 1100 kg? (Bila massa jenis es =  $0,92 \times$  massa jenis air)
5. Bila sebuah pipa kapiler dengan diameter 0,8 mm dicelupkan ke dalam methanol, maka methanol naik sampai ketinggian 15,0 mm. Jika besar sudut kontak nol, hitunglah tegangan permukaan methanol bila berat jenisnya 0,79!

6. Darah mengalir dalam pembuluh darah berjari-jari 9 mm dengan kecepatan 30 cm/det.
- Hitung laju aliran volume tiap menit!
  - Pembuluh darah terdiri dari banyak pipa kapiler sehingga luas penampangnya lebih besar dari penampang pipa kapiler. Jika semua pembuluh darah mengalir dalam pembuluh kapiler dan kelajuan aliran lewat kapiler adalah 1,0 mm/det, hitunglah luas penampang total pembuluh kapiler tersebut!



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. massa jenis, tekanan dalam fluida,
2. tegangan permukaan, dan
3. fluida bergerak.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab VIII

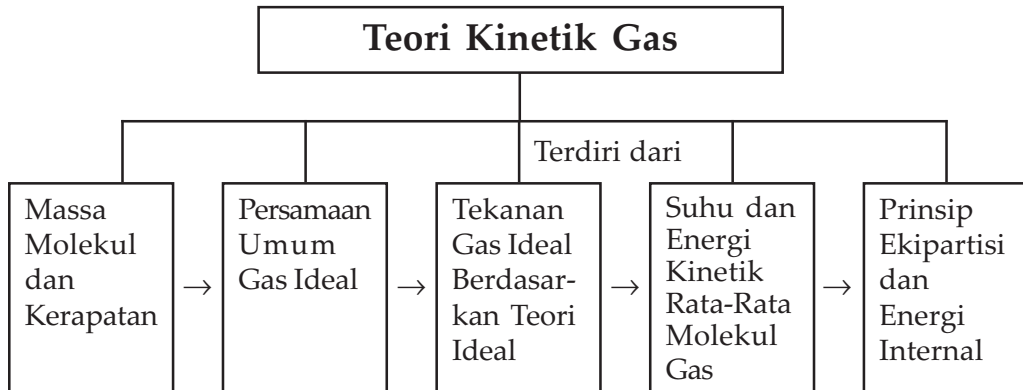
# Teori Kinetik Gas



Sumber : Internet : [www.nonemigas.com](http://www.nonemigas.com).

Balon udara yang diisi dengan gas massa jenisnya lebih kecil dari massa jenis udara mengakibatkan balon udara mengapung.

# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini kalian diharapkan mampu :

1. mengetahui perilaku gas beserta besaran-besaran yang berkaitan,
2. mengetahui hubungan antara tekanan, suhu, dan tekanan gas, dan
3. memanfaatkan teori kinetik gas dalam kehidupan sehari-hari.



## Motivasi Belajar

Tekanan gas timbul karena tumbukan antara partikel gas dengan dinding wadahnya. Tumbukan menyebabkan terjadinya perubahan momentum. Sedang momentum berkaitan dengan energi kinetik. Bagaimana hubungan antara tekanan dan energi kinetik? Untuk memahaminya, maka pelajilah materi bab ini dengan saksama.



## Kata-kata Kunci

massa molar, kinetika gas, gas ideal, tenaga kinetik rata-rata, teorema ekipartisi, tenaga internal

Ketika akan mempelajari perilaku gas dan juga besaran-besaran yang berkaitan dengan perilaku gas, sebaiknya terlebih dahulu kita akan membahas massa molekul dan kerapatan gas serta kita wajib mengetahui definisi 1 mol gas. Selanjutnya kita juga akan mempelajari persamaan keadaan untuk gas ideal. Persamaan keadaan merupakan persamaan yang menghubungkan antara tekanan, suhu, dan tekanan gas serta membahas kriteria gas ideal dan bagaimana timbul tekanan gas.

## A. Massa Molekul dan Kerapatan

Besaran yang akan kita bicarakan dalam topik ini adalah tekanan, volume, dan suhu yang merupakan besaran makroskopik. Besaran-besaran tersebut dapat kita ukur. Besaran lain adalah kecepatan rata-rata molekul yang merupakan besaran mikroskopik. Besaran mikroskopik tidak dapat kita ukur, tetapi dapat kita hitung. Antara besaran-besaran tersebut dihubungkan oleh massa dan kerapatan gas. Jadi sebelum kita membicarakan persamaan gas lebih dulu kita bahas massa molekul dan kerapatan molekul.

Mari kita tinjau dalam suatu ruang yang di dalamnya terdapat  $N$  molekul gas.  $N$  seringkali dinyatakan dalam satuan mol. 1 mol gas artinya dalam gas terdapat sebanyak  $6,022 \times 10^{23}$  buah molekul. Bilangan  $6,022 \times 10^{23}$  dinamakan bilangan Avogadro  $N_A$ .

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ molekul/mol} \quad \dots \quad (1)$$

Artinya : Satu mol zat berisi  $N_A$  buah partikel atau molekul. Jika kita memiliki  $n$  mol gas, artinya jumlah molekul gas kita adalah:

$$N = nN_A \quad \dots \quad (2)$$

Massa 1 mol zat disebut sebagai massa molar diberi simbol  $M$ . Misalkan O memiliki massa molar 16, maka 1 mol O massanya 16 gram.

Satuan yang digunakan adalah atom  $C^{12}$ . 1 mol Atom  $C^{12}$  memiliki massa  $12 \times 10^{-3}$  kg, jadi atom C memiliki massa molar.

$$\text{Massa molar} = C^{12} = \frac{12 \times 10^{-3} \text{ kg}}{1 \text{ mol}} = 12 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

Massa atom lain dibandingkan dengan massa atom  $C^{12}$ .

Bila sebuah molekul terdiri dari beberapa atom, massa molar molekul tersebut adalah jumlahan dari seluruh massa molar tiap atomnya.

Massa  $n$  mol gas adalah:

$$m = nM \quad \dots \quad (3)$$



### Contoh Soal 1

- a. Berapa massa molar molekul  $O_2$ ?

**Penyelesaian :**

Massa molar O adalah 16.

Massa molar  $O_2 = 16 + 16 = 32$

- b. Berapa jumlah molekul oksigen  $O_2$  bila beratnya 72 gram?

**Penyelesaian :**

$$\text{Jumlah mol oksigen} = \frac{m}{M} = \frac{72 \text{ gram}}{32 \text{ gram/mol}} = 2 \text{ mol}$$

Jumlah molekul Oksigen adalah:

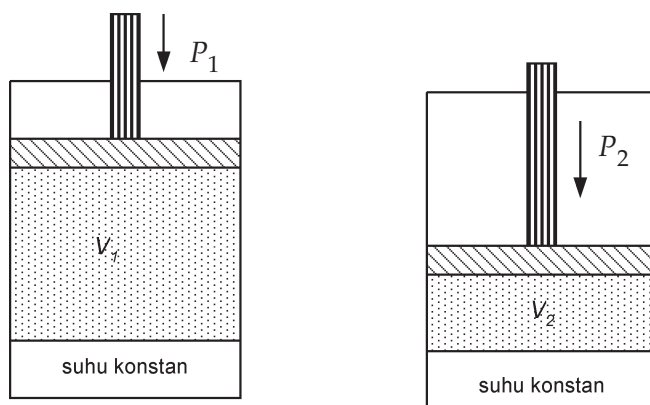
$$\begin{aligned} 2 \times N_A &= 2 \text{ mol} \times 6,022 \times 10^{23} \text{ molekul/mol} \\ &= 12,044 \times 10^{23} \text{ molekul.} \end{aligned}$$

## B. Persamaan Umum Gas Ideal

Andaikan kita memiliki satu tangki gas sembarang, kemudian tekanan dalam tangki kita sebut  $P$ , volume tangki adalah  $V$ , dan suhu dalam tangki adalah  $T$ . Kita bisa mengatur atau mengubah tekanan, suhu maupun volumenya. Ternyata antara  $P, V$  dan  $T$  saling memiliki kaitan tertentu. Persamaan yang meghubungkan antara  $P, V$  dan  $T$  dinamakan sebagai *persamaan keadaan gas*. Kita akan meninjau persamaan keadaan untuk gas ideal.

Bila tekanan dalam tangki kita ubah dan suhunya kita jaga agar tidak berubah atau suhunya konstan, ternyata volumenya ikut berubah. Jika kita memperbesar tekanan maka volumenya berkurang. Apabila kita memperbesar volume tangki ternyata tekanan akan mengecil. Jadi tekanan berubah berbanding terbalik dengan volumenya. **Robert Boyle** menemukan secara eksperimen bahwa:

$$PV = \text{konstan pada temperatur konstan} \quad \dots \quad (4)$$



**Gambar 8.1** Gas dalam suatu tangki, volumenya dapat berubah. Pada suhu yang kita buat konstan ternyata jika volumenya diperkecil tekanan akan membesar.

Hukum ini berlaku hampir untuk semua gas dengan kerapatan rendah.

Apabila sekarang tekanan kita jaga agar tetap, kemudian volume tangki kita ubah ternyata jika volume kita perbesar maka suhu dalam tangki naik. Kenaikan suhu sebanding dengan volumenya. Sifat ini berlaku untuk gas dengan kerapatan rendah. **Jacques Charles** dan **Gay Lussac** menemukan bahwa pada gas dengan kerapatan rendah berlaku



$$PV = CT \quad \dots \quad (5)$$

$C$  adalah konstanta kesebandingan.  $T$  adalah suhu mutlak. Satuan  $T$  adalah Kelvin,  $t$  suhu dalam satuan Celcius.

$$T = t + 273$$

Berapa besar  $C$  ? Misalkan kita punya dua wadah, tiap-tiap wadah tempat berisi jenis gas yang sama dan jumlah gas yang sama. Apabila kedua tempat tersebut kita satukan maka volumenya akan membesar menjadi dua kali. Tekanan dan suhunya tetap. Dengan demikian konstanta  $C$  menjadi dua kali semula. Hal ini berarti  $C$  sebanding dengan jumlah gas, atau dapat kita tuliskan sebagai:

$$C = kN \quad \dots \quad (6)$$

$k$  adalah konstanta yang baru,  $N$  adalah jumlah molekul gas. Persamaan (6) sekarang dapat kita tuliskan menjadi:

$$PV = NkT \quad \dots \quad (7)$$

Konstanta  $k$  disebut konstanta Boltzmann. Secara eksperimen nilai  $k$  adalah:

$$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad \dots \quad (8)$$

Persamaan keadaan untuk gas dengan kerapatan rendah menjadi:

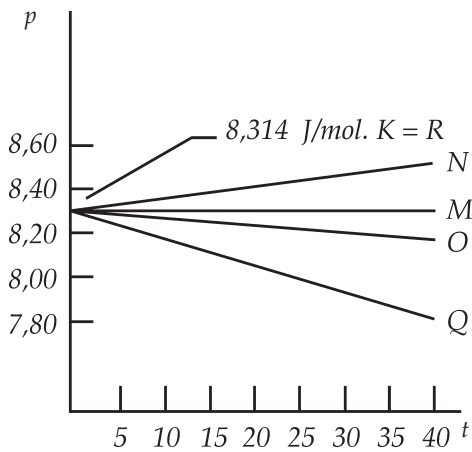
$$PV = nN_a kT = nRT \quad \dots \quad (9)$$

$R = kN_a$  adalah konstanta gas umum, nilainya untuk semua gas adalah  $R = 8,314 \text{ J/mol}$ .  $K = 0,08206 \text{ L.atm/mol.K}$

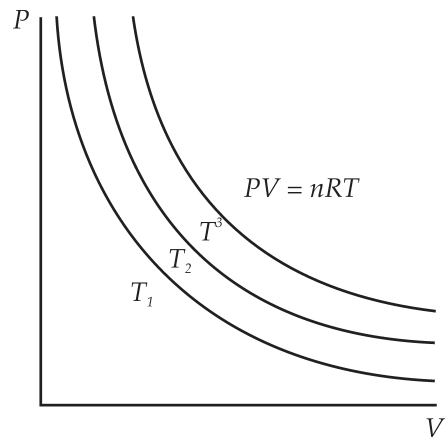
Untuk gas nyata, nilai  $PV/nT$  sangat mendekati konstan sampai pada range tekanan yang besar, kita bisa melihatnya pada Gambar (8.2). Gas ideal didefinisikan sebagai gas di mana  $PV/nT$  bernilai konstan untuk seluruh keadaan. Jadi gas ideal memenuhi persamaan:

$$PV = nRT \quad \dots \quad (10)$$

Gambar (8.3) Kurva keadaan isoterm untuk tiap  $T$  pada gas ideal



**Gambar 8.2** Untuk gas ideal nilai  $PV/nRT$  adalah konstan. Ini berlaku untuk tekanan rendah. Pada umumnya masih berlaku sampai tekanan beberapa atm. (Tipler, Fisika 1)



**Gambar 8.3** Menunjukkan kaitan  $P$  dan  $V$  pada suhu tertentu.  $V$  diubah-ubah pada suhu yang konstan. Keadaan ini dinamakan isoterm. Kurva pada gambar menunjukkan kurva isoterm. (Tipler, Fisika 1)

Nilai  $nR$  pada Persamaan (10) adalah konstan sehingga kita bisa menuliskan:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan}$$

atau

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \dots \quad (11)$$

Kita sering membaca gas dalam keadaan standar. Apa yang dimaksud dengan pada keadaan standar? Keadaan standar adalah keadaan gas pada saat tekanannya  $1 \text{ atm} = 101 \text{ kPa}$  dan suhu mutlak  $273 \text{ K}$  atau  $0^\circ\text{C}$ . Berapa volume  $1 \text{ mol}$  gas pada keadaan standar?

Dari persamaan (9) kita bisa menghitung volume gas.

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{(1 \text{ mol})(0,0821 \text{ atm/mol.K})(273)}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 22,4 \text{ L}$$

Pada keadaan standart volume gas apapun adalah  $22,4 \text{ l}$ .



## Contoh Soal 2

150 gram  $\text{CO}_2$  berada dalam ruang yang volumenya 60 ℓ, tekanannya 1 atm dalam temperatur ruangan. Jika volumenya dirubah menjadi 2 kali dengan suhu konstan. Berapa tekanannya sekarang?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$V_1 = 60 \text{ ℓ}, P_1 = 1 \text{ atm}, V_2 = 2 V_1 = 120 \text{ ℓ}, P_2 = ?$$

*Jawab :*

Suhu gas konstan maka berlaku  $P_1 V_1 = P_2 V_2$

$$P_2 = (1 \text{ atm})(60 \text{ ℓ}) / (120 \text{ ℓ}) = 0,5 \text{ atm atau setengah tekanan semula.}$$

Jika kalian menggunakan satuan tekanan atm maka gunakan liter untuk satuan volume. Jika kalian menggunakan Pa untuk satuan tekanan, maka gunakan  $\text{m}^3$  untuk satuan volume.



## Contoh Soal 3

Gas  $\text{O}_2$  memiliki volume 3 liter, suhunya  $20^\circ\text{C}$ , dan tekanannya 1 atm. Gas dipanaskan sehingga suhunya  $50^\circ\text{C}$  dan ditekan sampai volumenya 1,5 ℓ. Berapa tekanannya sekarang?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$V_1 = 3 \text{ ℓ}, T_1 = 20^\circ \text{ C} = 293 \text{ K}, T_2 = 50^\circ \text{ C} = 323 \text{ K}, V_2 = 1,5 \text{ ℓ}, P_2 = ?$$

*Jawab:*

Pada kasus ini kita menggunakan besar  $PV/T$  adalah konstan maka:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1 T_2}{T_1 V_2}$$

$$= \frac{(1 \text{ atm})(3 \text{ ℓ})(323 \text{ K})}{(1,5 \text{ ℓ})(292 \text{ K})} = 2,21 \text{ atm}$$



### Contoh Soal 4

Pada keadaan normal, berapa volume 42 gram gas  $O_2$  ?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

Massa molar  $O_2$  adalah  $16 + 16 = 32$ .

Jumlah oksigen =  $42/32$  mol.

Keadaan standart  $P = 1$  atm,  $T = 0^\circ = 273K$

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{1,3 (0,08206)(273)}{1} = 29,4 \text{ L}$$



### Seputar Tokoh :

Robert Boyle : Boyle menemukan bahwa pada gas ideal perkalian antara tekanan dengan volum adalah konstan, atau tekanan berbanding berbalik dengan volumenya.

*Sumber : Wikipedia*



### Wawasan Produktivitas : Etos Kerja

Setelah kalian mempelajari persamaan umum gas ideal, dapatkah kalian merangkai material untuk membuat pendingin ruangan? Lakukan percobaan hingga berhasil. Berkonsultasilah dengan gurumu!

## C. Tekanan Gas Ideal Berdasarkan Teori Gas Ideal

Kita telah mempelajari kelakuan gas dengan meninjau besaran-besaran  $P, V$ , dan  $T$  yang dapat kita ukur. Sekarang kita akan mempelajari keadaan mikroskopik gas atau kelakuan masing-masing partikel. Untuk meninjau kelakuan tiap-tiap partikel kita memerlukan posisi dan kecepatan masing-masing partikel gas. Kita tidak mungkin melakukannya, jadi kita akan membahas gerakan partikel secara rata-rata. Kita buat sebuah model gas ideal dengan asumsi :

1. Gas terdiri atas partikel-partikel, yang dapat berupa atom-atom atau molekul-molekul. Partikel-partikel dalam jumlah besar, saling bertumbukan elastik satu sama lain. Tiap molekul kita anggap sebagai molekul yang identik
2. Jarak rata-rata antarmolekul cukup besar dibandingkan dengan diameter molekul, dan tidak ada gaya interaksi antara molekul kecuali bila molekul bertumbukan. Tumbukan yang terjadi antarmolekul adalah tumbukan elastis dan berlangsung sangat singkat.
3. Tidak ada gaya dari luar (gaya gravitasi kita anggap cukup kecil) sehingga molekul bergerak secara acak, tidak memiliki posisi yang tetap, begitu juga dengan kecepatannya.
4. Volume partikel-partikel sangat kecil sehingga dapat diabaikan terhadap volume gas. Meskipun volume yang ditempati gas besar, tetapi volume yang diisi oleh partikel-partikel tersebut sangat kecil.

Asumsi di atas umumnya berlaku untuk gas dengan kerapatan rendah dan pada suhu yang tinggi. Perilaku ideal ini tidak berlaku pada tekanan yang tinggi atau pada suhu yang rendah. Pada tekanan yang tinggi atau suhu yang rendah kerapatan gas tinggi dan tidak terpisah jauh.

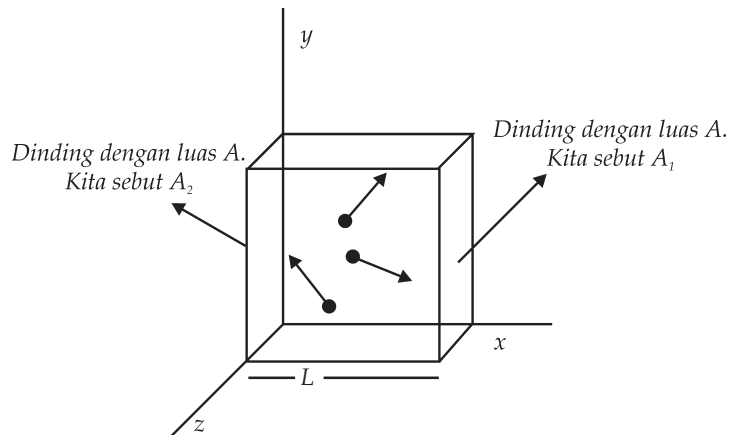
Tekanan yang timbul dalam gas berasal dari tumbukan antara molekul-molekul gas dengan dinding tempatnya. Tumbukan antarmolekul tidak berpengaruh pada momentum total karena momentumnya konstan. Tekanan dapat dihitung dengan menghitung laju perubahan momentum molekul-molekul gas atau impuls gas karena bertumbukan dengan dinding tempatnya. Saat molekul menumbuk dinding, gaya yang diberikan dinding pada molekul sehingga menimbulkan perubahan momentum adalah  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ .

Kalian masih ingat hukum Newton tentang gerak tersebut bukan? Menurut hukum Newton yang ketiga tentang aksi reaksi gaya tersebut sama dengan gaya yang diberikan oleh gas pada dinding tempatnya. Tekanan pada dinding adalah gaya persatuan luas dinding tempat gas.

Mari kita tinjau gas dalam ruangan dengan volume  $V$ . Massa tiap molekul adalah  $m$ . Jumlah gas dalam ruang adalah  $N$ . Perubahan momentum timbul saat molekul menumbuk dinding sehingga arahnya berubah atau berbalik arah. Mari

kita tinjau pada arah sumbu  $-x$ . Momentum sebelum tumbukan adalah  $mv_{x'}$  setelah tumbukan molekul berbalik arah momentumnya menjadi  $-mv_x$ . Gambar. (8.4) Perubahan tiap molekul momentum adalah:

$$\Delta p = mv_t - mv_o = m(-v_x - v_x) = -2mv_x \quad \dots \quad (12)$$



**Gambar 8.4** Molekul gas bergerak secara acak. Jarak antara dinding adalah  $L$  sehingga waktu untuk menumbuk kedua dinding adalah  $L/2v_x$

Perubahan momentum semua molekul selama  $Dt$  detik adalah  $2mv_x$  dikalikan jumlah tumbukan. Bila jarak antar dinding (Lihat gambar (8.4)) adalah  $L$  maka waktu yang diperlukan oleh sebuah molekul untuk menumbuk dinding adalah:

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x} \quad \dots \quad (13)$$

Jarak  $L$  kita kalikan dua karena partikel bergerak dari satu dinding menumbuk dinding lalu berbalik arah dan menumbuk dinding satunya. Laju perubahan momentum

akibat menumbuk dinding adalah  $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 2mv_x \frac{v_x}{2L}$

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv_x^2}{L}$$

Tekanan pada dinding adalah gaya persatuan luas dinding, yaitu:

$$P = \frac{F \Delta P}{A} = \frac{F \Delta P}{A \Delta t} = \frac{V_x}{AL} mv_x = \frac{V_x}{V} mv_x$$

Jika ada  $N$  partikel maka tekanan yang disebabkan oleh  $N$  partikel tersebut:

$$P = \frac{N}{V} m v_x^2 \quad \dots \quad (14)$$

Partikel tidak bergerak dengan kelajuan yang sama, sehingga kita gunakan kecepatan rata-rata partikel. Persamaan (14) bila kita kaitkan dengan energi kinetik menjadi:

$$PV = 2N \left( \frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{rata-rata} \quad \dots \quad (15)$$

Tinjauan di atas hanya pada arah sumbu  $x$ . Bila kita tinjau juga pada sumbu  $y$  dan sumbu  $z$  maka kecepatan rata-rata sebuah molekul adalah:

$$(v^2)_{rata-rata} = (v_x^2)_{rata-rata} + (v_y^2)_{rata-rata} + (v_z^2)_{rata-rata}$$

rata-rata kuadrat pada arah sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  adalah sama.

$$(v_x^2)_{rata-rata} = (v_y^2)_{rata-rata} = (v_z^2)_{rata-rata}$$

$$\text{maka} \quad (v_x^2)_{rata-rata} = \frac{1}{3} (v^2)_{rata-rata}$$

$$(v_x^2)_{rata-rata} = \frac{1}{3} (v^2)_{rata-rata}$$

Kita dapatkan persamaan yang menghubungkan antara  $P$ ,  $V$ , dan energi kinetik rata-rata:

$$PV = \frac{2}{3} N \left( \frac{1}{2} m v^2 \right)_{rata-rata} = \frac{2}{3} N K_{rata-rata} \quad \dots \quad (16)$$

dengan

$$K_{rata-rata} = \frac{1}{2} m (v^2)_{rata-rata}$$



### Contoh Soal 5

Tekanan gas  $O_2$  dalam suatu ruang adalah 101 kPa dan volume gas 22,4 l, banyak gas dalam ruang itu 1 mol. Berapa kecepatan rata-rata molekul gas? Berapa suhu gas?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$P = 101 \text{ kPa}, \quad V = 22,4 \text{ l} = 22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3, \quad n = 1 \text{ mol atau}$$

$$N = N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ molekul}$$

*Jawab :*

Energi kinetik rata-rata gas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (16):

$$PV = \frac{2}{3} NK_{rata-rata}$$

$$K_{rata-rata} = \frac{3PV}{2N} = \frac{3(101 \times 10^3 \text{ Pa})(22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{2(6,022 \times 10^{23} \text{ molekul})} = 5,64 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Suhu gas dapat kita cari

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{(101 \times 10^3 \text{ Pa})(22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{1(8,314 \text{ J/mol.K})} = 272,1 \text{ K}$$

Jadi suhu gas 272,1 K

Perhatikan satuan dan konstanta.

## D. Suhu dan Energi Kinetik Rata-Rata Molekul Gas

Di bagian depan kita telah mendapatkan bahwa  $PV = NkT$

Sedang dari persamaan (16) kita dapatkan  $PV = \frac{2}{3} NK_{rata-rata}$

Kedua persamaan di atas menghasilkan:

$$\frac{2}{3} N \left( \frac{1}{2} mv^2 \right)_{rata-rata} = NkT$$

$$K_{rata-rata} = \frac{3}{2} kT \quad \dots \quad (17)$$



Kita mendapatkan hubungan antara suhu mutlak dengan energi kinetik rata-rata molekul. Energi kinetik rata-rata molekul gas sebanding dengan suhunya.

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{rata-rata} = \frac{3}{2}kT$$

Maka kecepatan kuadrat rata-rata molekul adalah:

$$(v^2)_{rata-rata} = \frac{3kT}{m} = \frac{3RT}{M} \quad \dots \quad (18)$$

Kita dapatkan kelajuan akar rata-rata (*root mean square = rms*) molekul adalah:

$$v_{rms} = \sqrt{(v^2)_{rata-rata}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad \dots \quad (19)$$

Persamaan (19) menunjukkan bahwa kecepatan rata-rata hanya tergantung pada suhu dan massa molar. Tidak tergantung pada tekanan atau kerapatan. Persamaan (19) bisa kita tuliskan sebagai:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3}{M} \left( \frac{PV}{N\rho} \right)} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}} \quad \dots \quad (20)$$

$\rho$  adalah kerapatan gas dalam  $\text{kg/m}^3$  dan satuan **Pa** untuk tekanan. Jika dalam ruangan dengan suhu tertentu kemudian tekanannya diubah maka volume akan ikut berubah. Jika tekanan diperbesar maka volume akan mengecil sehingga kerapatan akan bertambah, sehingga perbandingan antara  $P$  dan kerapatan tetap. Jadi, kecepatan *rms* dan energi kinetiknya tetap selama suhu tidak dirubah.



### Contoh Soal 6

Gas Oksigen memiliki massa molar 32 g/mol. Hitunglah kelajuan *rms* Oksigen pada suhu 27 °C.

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$M$  oksigen 32 g/mol =  $32 \times 10^{-3}$  kg/mol,

$T = 27^\circ\text{C} = 273 + 27 = 300\text{K}$ ,

*Jawab :*

Kelajuan *rms* Oksigen dapat dicari dengan menggunakan persamaan (19)

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3(8,314 \text{ J/mK})(300 \text{ K})}{32 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}} = 483 \text{ m/det}$$

Jadi, kelajuan *rms* = 483 m/det.



### Contoh Soal 7

Berapa energi kinetik 48 gram  $\text{O}_2$ , bila volumenya 22,4 liter, dan tekanannya 101 kPa.

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

Berat gas  $\text{O}_2$  = 48 gram, atau  $48/32 = 1,5$  mol, volume 22,4 l, tekanan 101 kPa

*Jawab :*

Kita bisa menghitung energi kinetik gas dengan menggunakan persamaan (16)

$$\begin{aligned} PV_{rata-rata} &= \frac{2}{3} NK_{rata-rata} \\ K_{rata-rata} &= \frac{2PV}{N} \\ &= \frac{2 \cdot (101 \text{ kPa}) (22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{1,5 (6,02 \times 10^{23})} \\ &= 5 \times 10^{-21} \end{aligned}$$

Jadi, energi kinetiknya =  $5 \times 10^{-21}$  J



### Contoh Soal 8

Berapa perbandingan kelajuan rata-rata molekul gas hidrogen dan gas oksigen pada suhu 27°C?

**Penyelesaian :**

Dengan menggunakan persamaan (19)

$$\frac{v_{rmsH}}{v_{rmsO_2}} = \frac{\sqrt{\frac{3RT}{M_H}}}{\sqrt{\frac{3RT}{M_{O_2}}}} = \sqrt{\frac{M_{O_2}}{M_H}} = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4$$

Jadi perbandingan kelajuan *rms* Hidrogen dan Oksigen adalah 4:1.

Sekarang kita tahu bahwa perbandingan kelajuan *rms* antara dua jenis gas sama dengan perbandingan terbalik akar kedua massa gas tersebut.

## E. Prinsip Ekipartisi dan Energi Internal

Persamaan (17) menunjukkan kepada kita hubungan antara energi kinetik translasi gas dengan suhu untuk gas ideal. Mari kita tuliskan kembali:

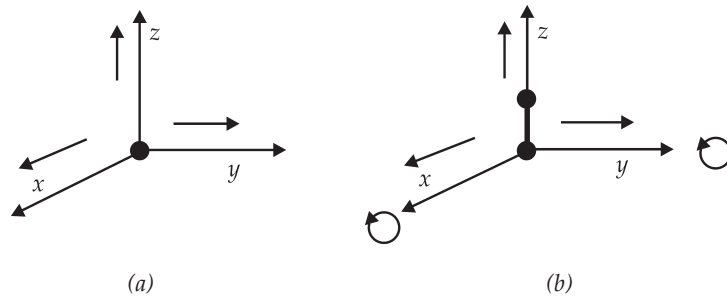
$$K_{rata-rata} = \frac{3}{2} kT$$

Kecepatan rata-rata pada persamaan (17) tersebut bila kita nyatakan dalam kecepatan rata-rata pada arah *x*, *y*, dan *z* adalah:

$$\frac{3}{2} kT = K_{rata-rata} = \left( \frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{rata-rata} + \left( \frac{1}{2} m v_y^2 \right)_{rata-rata} + \left( \frac{1}{2} m v_z^2 \right)_{rata-rata}$$

$$\frac{1}{2} kT = \left( \frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{rata-rata} = \left( \frac{1}{2} m v_y^2 \right)_{rata-rata} = \left( \frac{1}{2} m v_z^2 \right)_{rata-rata} \dots (21)$$

Kita dapatkan energi kinetik translasi pada tiap arah sama sebesar  $(kT)/2$ .



**Gambar 8.5** Gambar (a). Gas monoatomik, gerakan translasi ke arah sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . (b). Molekul gas diatomik selain memiliki gerak translasi juga gerak rotasi terhadap sumbu  $x$  dan  $y$

Gas kita asumsikan bebas bergerak ke arah sumbu  $x$ , sumbu  $y$ , dan sumbu  $z$  dan memiliki kecepatan rata-rata yang sama untuk ketiga arah tersebut. Sebenarnya asumsi tersebut hanya berlaku untuk gas monoatomik. Gas monoatomik memiliki derajat kebebasan sebesar 3. Untuk gas diatomik terjadi gerak translasi dan gerak rotasi terhadap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Dari gerak rotasi terhadap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  hanya dua yang berpengaruh yaitu sumbu  $x$  dan  $y$ . Rotasi terhadap sumbu yang sejajar arah sumbu ikatan molekul (sumbu  $z$ ) dapat diabaikan sehingga hanya dua suku energi rotasi yang dipakai yaitu  $\frac{1}{2}I\omega_y^2$  dan  $\frac{1}{2}I\omega_x^2$ . Kita bisa melihatnya pada Gambar (8.5), sehingga Persamaan (17) untuk gas diatomik adalah:

$$K_{rata-rata} = \frac{1}{2} m (v_x^2)_{rata-rata} + \frac{1}{2} m (v_y^2)_{rata-rata} + \frac{1}{2} m (v_z^2)_{rata-rata}$$

$$K_{rata-rata} = \frac{1}{2} I \omega_y^2 + \frac{1}{2} I \omega_x^2 = \frac{5}{2} kT \quad \dots (22)$$

Tiap suku besarnya  $(kT)/2$  akar rata-rata kecepatan menjadi:

$$v_{rms} = \sqrt{(v^2)_{rms}} = \sqrt{\frac{5RT}{M}} \quad \dots (23)$$

Derajat kebebasan dihubungkan dengan energi kinetik translasi, energi kinetik rotasi, energi kinetik vibrasi, dan energi potensial vibrasi. Untuk gas poliatomik derajat kebebasan akan bertambah besar. Energi kinetik yang dimiliki tidak hanya energi kinetik translasi dan rotasi, tetapi juga vibrasi dan energi potensial vibrasi.

### **Teorema ekipartisi**

*Tiap derajat kebebasan memiliki Energi rata-rata sebesar  $\frac{1}{2} kT$  untuk tiap molekul atau  $\frac{1}{2} RT$  tiap mole gas, bila zat berada dalam kesetimbangan*

Apa kaitan antara tenaga kinetik partikel dengan tenaga internal? Energi internal atau energi dalam adalah energi yang ada di dalam sistem. Energi tersebut merupakan sifat mikroskopik zat yang tidak tampak dari luar. Kita hanya bisa mengukur perubahan energi dalam. Kita sudah membahas tentang energi kinetik gas. Energi kinetik tersebut dihasilkan oleh gerak translasi molekul-molekul gas. Besar energi kinetik molekul gas monoatomik tergantung pada suhunya sebagai:

$$K = \frac{3}{2} nRT \quad \dots \quad (24)$$

Jika energi ini diambil sebagai energi dalam total gas, maka energi internal hanya tergantung pada suhu saja, tidak tergantung pada volume dan tekanannya.

$$U = \frac{5}{2} nRT \quad \dots \quad (25)$$

Besarnya energi dalam tergantung pada jenis gas. Untuk molekul gas diatomik misalnya maka kita bisa mengambil  $U = \frac{5}{2} nRT$  karena kita tahu energi kinetik pada molekul gas diatomik berasal dari energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi. Sehingga derajat kebebasannya 5.

Seandainya yang diambil sebagai energi dalam memasukkan jenis energi lain, nilainya akan berbeda dengan persamaan (25) dan mungkin akan tergantung pada volume dan tekanan. Misalnya, gas dengan kerapatan tinggi, terdapat interaksi antara molekul-molekul gas, sehingga diperlukan usaha untuk menambah atau mengurangi jarak. Dengan demikian energi internal akan bergantung pada volume. Perubahan energi dalam dapat dituliskan:

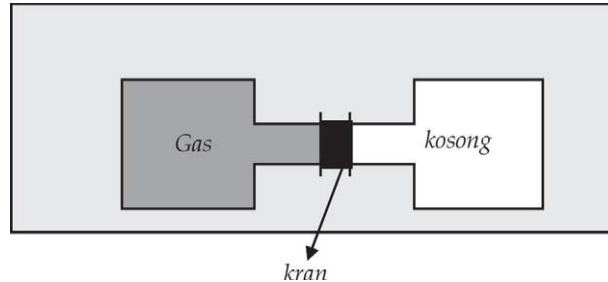
$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad \dots \quad (26)$$

Energi dalam hanya tergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir, tidak tergantung pada cara untuk mencapai keadaan akhirnya dari keadaan awalnya.

### ***Ekspansi Bebas***

Apakah energi internal dipengaruhi oleh volume? Joule melakukan eksperimen yang menarik untuk mengetahui apakah energi internal dipengaruhi oleh volumenya. Lihatlah Gambar (8.6), pada mulanya ruangan di sebelah kiri berisi gas, dan ruangan di sebelah kanan kosong. Kedua ruang dihubungkan dengan kran yang dapat dibuka. Mula-mula kran ditutup. Seluruh sistem terisolasi, dengan demikian tidak ada kalor yang masuk dan yang keluar tidak ada perubahan volume (nanti kita akan tahu jika tidak ada perubahan volume maka gas tidak melakukan usaha atau tidak dilakukan gas pada gas). Saat kran dibuka maka gas akan mengalir dari ruangan sebelah kiri menuju ruangan sebelah kanan. Proses ini disebut ekspansi bebas (pemuaian bebas). Proses akan berhenti sampai tercapai kesetimbangan termis. Ruangan terisolasi sehingga energi internal gas akhir sama dengan energi internal awal. Jika molekul gas saling melakukan gaya tarik menarik, maka energi potensial yang dihubungkan dengan perubahan jarak akan naik jika volumenya naik. Karena energi kekal, maka energi kinetik translasi akan mengecil jika energi potensialnya membesar. Energi kinetik translasi jika mengecil,

maka suhu akan menurun. Akan tetapi suhu ternyata tidak turun, suhu akhir sama dengan suhu awal. Kita dapat mengambil kesimpulan tidak ada energi potensial pada gas tersebut.



**Gambar 8.6** Pemuaian bebas gas. Bila kran dibuka gas akan mengalir menuju ruang yang kosong. Tidak ada kalor yang masuk maupun yang keluar karena ruang terisolasi. Energi internal akhir sama dengan energi internal awal, dan ternyata tidak ada penurunan suhu.

Eksperimen yang dilakukan Joule berlaku untuk gas dengan kerapatan rendah. Untuk gas dengan kerapatan tinggi maka suhu akhir menurun sedikit, dengan demikian ada komponen tenaga potensial pada energi internal gas.



### Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Carilah artikel di media cetak atau elektronik yang membahas tentang penerapan ekspansi bebas. Kupaslah dan hasilnya diserahkan pada guru kalian.



### Contoh Soal 9

#### Soal Ebtanas 1999

Dalam ruangan yang bervolume 3 liter terdapat 400 miligram gas dengan tekanan 1 atm. Jika 1 atm = 105 N/m, maka kelajuan rata-rata partikel gas tersebut adalah:

- a.  $1,5 \times 10^2$  m/s
- b.  $1,5 \times 10^3$  m/s

- c.  $2,25 \times 10^3$  m/s
- d.  $3 \times 10^3$  m/s
- e.  $9 \times 10^3$  m/s

**Penyelesaian :**

$V = 3$  l, massa gas  $400 \times 10^{-6}$  kg,  $P = 1$  atm =  $10^5$  N/m

$$\text{Kerapatan gas } \rho = \frac{M}{V} = \frac{0,4 \times 10^{-3} \text{ kg}}{3 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 0,13 \text{ kg/m}^3$$

Dengan menggunakan persamaan (20)

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}} = \sqrt{\frac{3(10^5)}{1,3}} = 1,5 \times 10^3 \text{ m/det}$$

Jadi jawabannya adalah b



## Contoh Soal 10

### Soal UMPTN 1999

Dua tabung diisi dengan gas berbeda tetapi keduanya berada pada suhu yang sama. Diketahui  $M_A$  dan  $M_B$  adalah berat molekul kedua gas tersebut. Dengan demikian besar momentum rata-rata kedua gas yaitu  $P_A$  dan  $P_B$  akan berkaitan satu sama lain menurut rumus:

- |                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| A. $P_A = P_B$                        | D. $P_A = \frac{M_B}{M_A} P_B$        |
| B. $P_A = \sqrt{\frac{M_A}{M_B}} P_B$ | E. $P_A = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} P_B$ |
| C. $P_A = \frac{M_A}{M_B} P_B$        |                                       |

**Penyelesaian :**

Momentum adalah  $p = mv$ . Dari soal diketahui berat molekul adalah  $M$ . Dengan menggunakan kecepatan rata-rata masing-masing  $p_A = M_A g v_{rms}$ . Massa molar gas adalah  $MxN_A$



$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{M_A V_{A,rms}}{M_B V_{B,rms}}$$

$$\frac{V_{A,rms}}{V_{B,rms}} = \frac{\sqrt{\frac{3RT}{(M_A/g) \times N_A}}}{\sqrt{\frac{3RT}{(M_B/g) \times N_A}}}$$

maka jawaban yang benar adalah B



## Ringkasan

1. Massa molar dan jumlah zat  
Massa 1 mol zat disebut sebagai massa molar diberi simbol  $M$ .  
Satu mol zat berisi  $N_A$  buah partikel atau molekul  
 $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  molekul/mol
2. Persamaan Umum Gas Ideal  
Persamaan umum untuk gas ideal adalah:  
 $PV = NkT$  atau  $PV = nRT$   
Konstanta  $k$  adalah konstanta Boltzman.  $k = 1,381 \times 10^{-23}$  J/K,  
 $R = 8,314$  J/mol.  
 $K = 0,08206$  L.atm/mol.K
3. Tekanan Gas Ideal berdasarkan teori Gas Ideal  
Tekanan yang timbul dalam gas berasal dari tumbukan antara molekul-molekul gas dengan dinding tempatnya.

$$PV = \frac{2}{3} N \left( \frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)_{rata-rata} = \frac{2}{3} N K_{rata-rata}$$

$$K_{rata-rata} = \left( \frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)_{rata-rata} = \frac{3}{2} kT$$

Kelajuan akar rata-rata (root mean square =  $rms$ ) molekul adalah:

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{(v^2)_{rata-rata}}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

4. Teorema ekipartisi menyatakan  
Tiap derajat kebebasan memiliki Energi rata-rata sebesar  $\frac{1}{2} kT$  untuk tiap molekul atau  $\frac{1}{2} RT$  tiap mole gas, bila zat berada dalam kesetimbangan



A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!


- A.  $\frac{1}{4}$


D. 8


B. tetap


E.  $\frac{1}{8}$


C. 4

- A. 

- D. 

- B.
- 
- A graph with pressure  $P$  on the vertical axis and volume  $V$  on the horizontal axis. The curve starts at the origin  $(0,0)$  and increases monotonically with a positive slope, representing an isothermal expansion of an ideal gas.

- E.
- 
- A P-V diagram with pressure  $P$  on the vertical axis and volume  $V$  on the horizontal axis. A straight line connects the point  $(0, P)$  on the vertical axis to the point  $(V, 0)$  on the horizontal axis, forming a right triangle with the axes.

- C.
- 

3. Energi dalam gas ideal merupakan fungsi dari ....
- A. volume
  - B. volume dan suhu
  - C. suhu
  - D. tekanan
  - E. tekanan dan suhu

4. 6,9 liter gas ideal suhunya  $27^{\circ}\text{C}$  dan tekanan  $60\text{ N/m}^2$ . Jika  $k = 1,38 \times 10^{-23}\text{ J/k}$  berarti jumlah partikel gas tersebut adalah ....
  - A.  $10^{16}$
  - B.  $10^{18}$
  - C.  $10^{19}$
  - D.  $10^{20}$
  - E.  $10^{22}$
  
5. Bila suhu ruang tertutup dinaikkan menjadi 4 kali semula maka kecepatan molekul rata-rata menjadi ....
  - A. tetap
  - B.  $\frac{1}{4}$  kali
  - C.  $\frac{1}{2}$  kali
  - D. 4 kali
  - E. 2 kali
  
6. Suatu jenis gas menempati volume  $100\text{ cm}^3$  pada temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Bila temperatur menjadi  $50^{\circ}\text{C}$  sedangkan tekanan menjadi 2,0 atm maka volume gas akan menjadi ....
  - A.  $38,4\text{ cm}^3$
  - B.  $45,5\text{ cm}^3$
  - C.  $59,2\text{ cm}^3$
  - D.  $84,5\text{ cm}^3$
  - E.  $118,3\text{ cm}^3$
  
7. Sejumlah gas ideal dipanaskan pada tekanan tetap  $2 \times 10^4\text{ N/m}^2$ , sehingga volumenya berubah dari  $20\text{ m}^3$  menjadi  $30\text{ m}^3$ . Usaha luar yang dilakukan gas selama pemuaian adalah ....
  - A.  $10^5\text{ J}$
  - B.  $2 \times 10^5\text{ J}$
  - C.  $10^6\text{ J}$
  - D.  $2 \times 10^6\text{ J}$
  - E.  $10^7\text{ J}$
  
8. Jika volume gas ideal diperbesar dua kali volume semula dan ternyata energi dalamnya menjadi empat kali semula, maka tekanan gas tersebut menjadi ....
  - A. konstan
  - B.  $\frac{1}{4}$  kali
  - C.  $\frac{1}{2}$  kali
  - D. 2 kali
  - E. 4 kali

9. Helium 1 l pada tekanan 1 atm dan suhu  $27^{\circ}\text{C}$  dipanaskan hingga tekanannya dan volumenya menjadi dua kali semula. Maka temperatur akhirnya adalah ....
  - A.  $1,5 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$
  - B.  $2 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$
  - C.  $3 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$
  - D.  $6 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$
  - E.  $6 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$
10. Di dalam ruangan yang bervolume 3 liter terdapat 100 miligram gas dengan tekanan 1 atmosfer. Jika 1 atmosfer  $10^5 \text{ N/m}^2$ , maka kelajuan rata-rata partikel gas tersebut adalah ....
  - A.  $1,5 \times 10^2 \text{ m/s}$
  - B.  $1,5 \times 10^3 \text{ m/s}$
  - C.  $2,25 \times 10^3 \text{ m/s}$
  - D.  $3 \times 10^3 \text{ m/s}$
  - E.  $9 \times 10^3 \text{ m/s}$

**B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!**

1. Suatu gas ditahan agar bertekanan konstan. Jika temperatur diubah dari  $50^{\circ}\text{C}$  menjadi  $100^{\circ}\text{C}$ , menjadi berapa kali semula volume gas sekarang?
2. Sebuah ruang berukuran  $6\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$ . (a) Jika tekanan udara dalam ruang adalah 1 atm dan temperaturnya 300 K, carilah jumlah mol udara dalam ruang! (b) Jika temperatur naik menjadi 5 K dan tekanan tetap konstan, berapa mol udara yang meninggalkan ruang?
3. Carilah  $v_{rms}$  gas Argon jika 1 mol gas Argon dimasukkan dalam sebuah tabung bervolume 1 liter pada tekanan 10 atm. ( $M=40 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ) dan Bandingkan  $v_{rms}$  untuk atom helium pada kondisi yang sama ( $M=4 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ )
4. Carilah energi kinetik translasi total 1 L gas oksigen yang ditahan pada temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm!

5. Carilah kelajuan *rms* dan energi kinetik rata-rata atom hidrogen pada temperatur  $10^7$  K.
6. Sebuah ban mobil diisi sampai bertekanan gauge 200kPa ketika temperaturnya  $20^\circ\text{C}$ . Setelah mobil berjalan dengan kelajuan tinggi, temperatur bertambah menjadi  $50^\circ\text{C}$  (a). Dengan mengasumsikan bahwa volume ban tidak berubah, carilah tekanan gauge udara di dalam ban (anggap udara adalah gas ideal) (b) Hitung tekanan gauge jika ban memuai sehingga volumenya bertambah menjadi 10%.



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. massa molekul dan kerapatan,
2. persamaan umum gas ideal,
3. tekanan gas ideal berdasarkan teori gas ideal,
4. suhu dan energi kinetik rata-rata molekul gas, dan
5. prinsip ekipartisi dan energi internal.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

## Bab IX

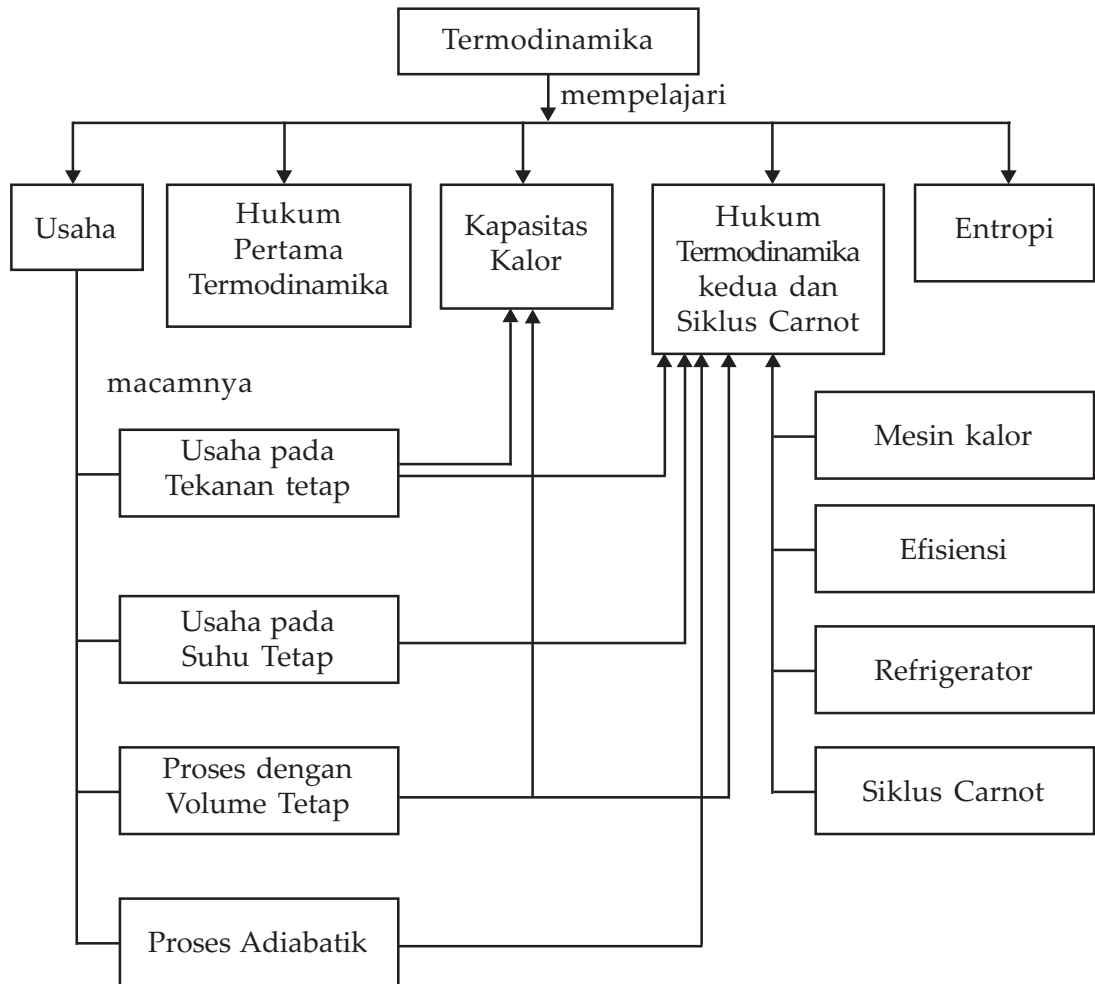
# Termodinamika



Sumber : Internet, [train locomotif.com](http://trainlocomotif.com).

*Energi panas dan transformasinya dapat digunakan untuk menggerakkan mesin uap pada kereta lokomotif.*

# Peta Konsep



## Tujuan Pembelajaran :

Setelah kalian mempelajari bab ini kalian diharapkan mampu menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.



## Motivasi Belajar

Sebagian besar energi saat ini diperoleh dari pembakaran fosil (minyak bumi, gas alam, dan batubara). Dalam mempergunakannya kita harus efisien. Penggunaan energi yang efisien harus dengan hukum-hukum alam, seperti hukum kekekalan energi. Selain itu, hukum-hukum lain juga digunakan pada energi dalam bentuk kalor dan usaha. Termodinamika adalah cabang Fisika yang mempelajari hukum-hukum dasar tentang kalor dan usaha. Bagaimanakah hukum-hukum itu berlaku di alam semesta ini?



## Kata-kata Kunci

isokorik, isotermik, isobarik, adiabatik, energi internal, kapasitas kalor, mesin kalor, siklus Carnot, entropi

Kita akan mempelajari salah satu cabang Fisika, yaitu termodinamika. Termodinamika adalah ilmu tentang suhu, panas, dan pertukaran energi (Tipler). Kalian telah mempelajari tentang panas pada kelas X, gas ideal dan perilakunya secara mikroskopik yang berkaitan dengan suhu. Dalam bab termodinamika ini akan membahas tentang pertukaran energi pada gas.

Usaha dapat dilakukan oleh gas ideal. Usaha dapat dilakukan dengan berbagai macam proses. Dalam materi asas ideal, kita juga akan membahas hukum termodinamika yang pertama yang sebenarnya menunjukkan hukum kekekalan tenaga.

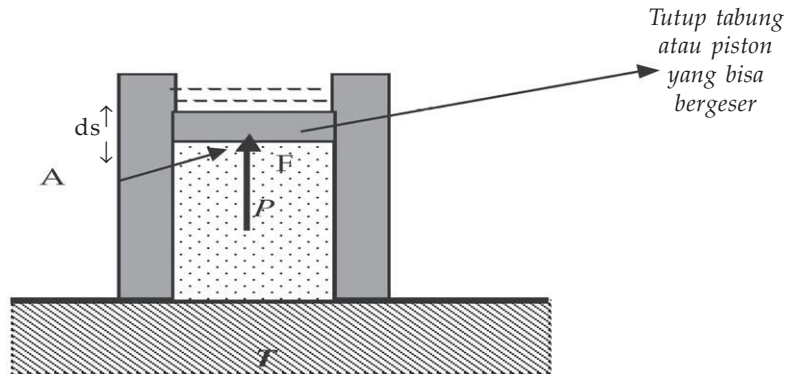
## A. Usaha

Kita sudah mempelajari tentang usaha pada semester lalu. Apabila melakukan usaha pada suatu sistem, maka kita memindahkan tenaga kita ke sistem. Sekarang kita akan membahas usaha pada gas.

Perhatikan Gambar (9.1) sebuah tabung yang terpasang dengan rapat, tutup tabung bisa digeser, kita asumsikan tidak ada gesekan. Tabung berisi gas. Bila tutup tabung kita gerakkan maka volume akan berubah, tekanan atau suhu, atau keduanya



akan berubah, sesuai dengan persamaan keadaan gas. Begitu juga dengan gambar tabung di atas. Jika diberi kalor dari bawah maka suhunya berubah.



**Gambar 9.1** Sebuah tabung yang diisi gas. Luas piston atau penghisap adalah  $A$ . Piston dapat bergeser sebesar  $ds$ .  $ds$  bisa ke atas atau ke bawah. Tekanan dalam tabung dapat menggerakkan piston.

Apabila diatur suhunya dengan cara dipanasi, maka tekanan semakin tinggi dan gas akan mengembang secara perlahan serta memberikan tekanan pada tutup tabung. Gaya yang diberikan gas pada tutup tabung adalah  $PA$ , dengan  $A$  adalah luas tutup. Jika tutup bergeser sejauh  $ds$  maka usaha yang dilakukan gas pada tutup yaitu  $dW$  adalah:

$$dW = Fds = PAdx = P\Delta V \quad \dots \quad (1)$$

Dari persamaan gas kita tahu perubahan  $P$  akan diikuti  $V$  atau  $T$  atau keduanya. Demikian juga perubahan  $V$  akan diikuti perubahan  $T$ ,  $V$  atau keduanya. Kita bisa mengatur agar salah satu dari besaran  $V$ ,  $P$  atau  $T$  konstan. Kita bisa mengetahui keadaan gas dengan mengetahui dua besaran. Misalkan kedua besaran itu adalah  $P$  dan  $V$ , maka kita dapat menyatakan keadaan gas dengan diagram  $P$  berbanding  $V$ . Tiap titik pada diagram menyatakan keadaan tertentu dari gas.

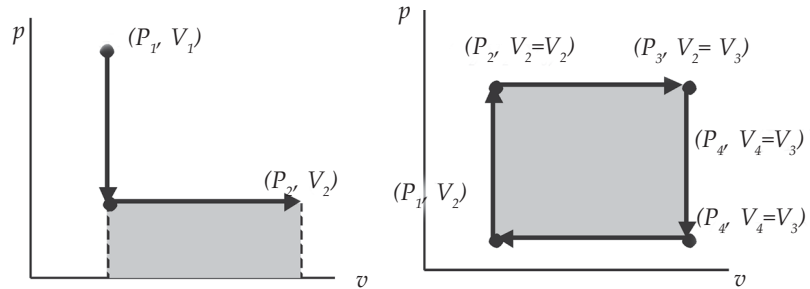
Bila proses terjadi pada tekanan tetap kita bisa mencari usaha yang dilakukan gas menggunakan Persamaan (1), bila proses terjadi tidak pada tekanan konstan maka usaha adalah luasan daerah di bawah diagram  $PV$ .

$$W = \int Pdv = \text{luasan di bawah kurva } PV \quad \dots \quad (2)$$

Besarnya usaha tergantung pada proses yang dilakukan, atau lintasan yang dilakukan. Satuan untuk usaha adalah Joule, seringkali dinyatakan dalam liter atm.

$$1 \text{ l.atm} = (10^{-3} \text{ m}^3) (101,3 \times 10^3 \text{ N/m}^2) = 101,3 \text{ J}$$

**Gambar 9.2** Usaha pada berbagai proses dari keadaan  $P_1V_1$  menjadi  $P_2V_2$ . Usaha adalah luas-luasan yang diarsir. Besarnya usaha tergantung pada prosesnya, tampak luas-luasan yang diarsir berbeda meskipun memiliki titik akhir dan titik awal yang sama.



## 1. Usaha pada Tekanan Tetap

Bila kita mengatur agar  $P$  konstan maka proses yang terjadi kita namakan proses *isobarik*. Tinjau tabung di atas gambar (9.1), jika  $P$  konstan kemudian suhu kita ubah, maka akan terjadi perubahan volume.

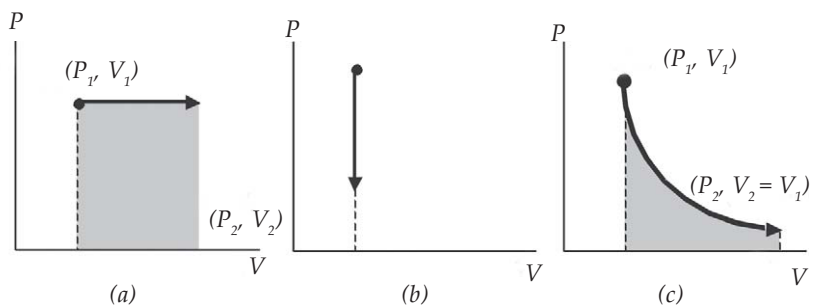
Persamaan keadaan pada proses isobarik adalah:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan},$$

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \dots \quad (3)$$

Diagram  $PV$  pada proses isobarik ditunjukkan Gambar (9.3a)

**Gambar 9.3** (a) Diagram  $PV$  pada proses isobarik,  $W$  adalah luas-luasan yang diarsir. (b) Diagram  $PV$  pada proses isokhorik,  $W=0$ . (c) Diagram  $PV$  pada proses isotermik  $W$  adalah luas-luasan yang diarsir



Besarnya usaha yang dilakukan gas adalah:

$$W = P\Delta V \quad \dots \quad (4)$$

$W$  adalah luasan yang diarsir pada Gambar (9.3a). Jika selama proses volumenya membesar maka usahanya positif, artinya gas melakukan usaha. Jika selama proses volume gas mengecil maka usaha dilakukan pada gas.



### Contoh Soal 1

4 liter gas ideal pada tekanan 2 atm dipanaskan sehingga volumenya mengembang dengan tekanan konstan sampai mencapai 6 l. Berapa usaha yang dilakukan oleh gas?

**Penyelesaian :**

Diketahui :

$$V = 4 \text{ l}, \quad P_1 = 2 \text{ atm}, \quad V_2 = 6 \text{ l}$$

Jawab :

Usaha pada tekanan konstan

$$W = P\Delta V = (20 \text{ atm})(6-4) = 4 \text{ atm.l}$$

## 2. Usaha pada Suhu Tetap

Proses dengan suhu konstan disebut proses isothermal. Persamaan keadaan pada proses isothermal adalah:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan}, \quad PV = \text{konstan} \quad P_1V_1 = P_2V_2$$

$$\text{Kaitan antara } P \text{ dan } V \text{ adalah } P = \frac{nRT}{V}.$$

Tinjaulah tabung pada Gambar (9.1). Jika semula tutup kita tekan, atau kita beri gaya sehingga memiliki tekanan  $P_1$ , volume  $V_1$ , kemudian suhunya kita perbesar lalu kita jaga agar suhunya tetap. Bila gaya kita lepaskan, tutup akan bergeser sehingga volumenya berubah menjadi  $V_2$ , atau gas melakukan usaha. Tekanannya juga berubah menjadi  $P_2$ .

Usaha yang dilakukan gas adalah luas daerah di bawah kurva  $PV$  atau kita dapat menghitungnya.

$$W = \int P dV = \int \frac{nRT}{V} dV \quad \dots \quad (5)$$

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots \quad (6)$$

Gambar diagram  $PV$  dan usaha yang dilakukan gas ditunjukkan pada Gambar (9.3c).

### 3. Proses dengan Volume Tetap

Proses dengan volume tetap dinamakan proses *isokorik*. Persamaan keadaan pada proses ini:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan}, \frac{P}{T} = \text{konstan}$$

atau

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \dots \quad (7)$$

Diagram  $PV$  dan usaha yang dilakukan ditunjukkan oleh Gambar (9.3c)

Pada proses isokorik volume konstan. Jadi tidak ada kerja yang dilakukan oleh gas. Jika suhu ditambah dengan pemanasan, maka tekanan akan bertambah, gaya yang bekerja pada dinding bertambah tetapi karena volume tetap maka usaha yang dilakukan adalah nol.

### 4. Proses Adiabatik

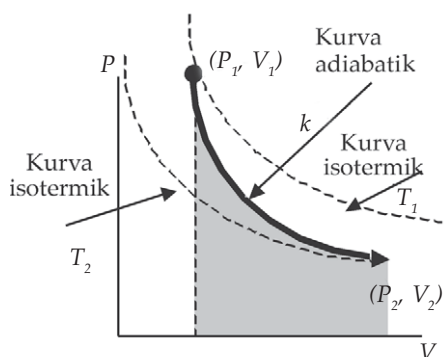
Proses selain isotermik, isobarik, dan isokorik terdapat proses adiabatik. Pada proses adiabatik adalah suatu proses perubahan keadaan gas tanpa ada tenaga yang masuk atau tenaga yang keluar. Bentuk tenaga yang kita pakai adalah kalor, sehingga kita bisa mengatakan pada proses adiabatik tidak ada kalor yang mengalir keluar ataupun mengalir masuk.

Perhatikan tabung pada gambar (9.1) bila sejumlah gas berada pada tabung tersebut, pada volume tertentu kemudian dipanaskan agar memiliki suhu tertentu. Setelah itu tabung

diisolasi sehingga tidak ada tenaga yang keluar. Gas akan memuai secara adiabatik. Volume akan mengembang dan suhu akan berubah. Diagram  $PV$  untuk proses adiabatik agak mirip dengan proses isotermik tetapi terpotong karena ada perubahan suhu.

Persamaan yang menyatakan grafik pada diagram  $PV$  proses adiabatik dari keadaan awal  $(P_1, V_1)$  menjadi keadaan akhir  $(P_2, V_2)$  adalah

$$PV^\gamma = \text{konstan atau}$$



**Gambar 9.4** Diagram  $PV$  proses adiabatik. Usaha yang dilakukan adalah luasan yang diarsir.

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad \dots \quad (8)$$

$\gamma$  adalah perbandingan antara kapasitas panas pada tekanan konstan dengan kapasitas panas pada volume konstan. Berikut ini kita akan mempelajari lebih lanjut tentang kapasitas panas.

Untuk gas ideal berlaku persamaan  $P = \frac{nRT}{V}$  sehingga Persamaan (8) menjadi:

$$\frac{nRT_1}{V_1} V_1^\gamma = \frac{nRT_2}{V_2} V_2^\gamma \quad \dots \quad (9)$$

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \quad \dots \quad (10)$$

## B. Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika sebenarnya adalah kekekalan tenaga yang menghubungkan antara usaha yang dilakukan pada sistem, panas yang ditambahkan atau dikurangkan, dan tenaga dalam sistem. Jika usaha dilakukan oleh sistem pada lingkungan misalkan gas mengembang sehingga volume tabung membesar maka usaha  $W$  bertanda

positif (+). Jika usaha dilakukan pada sistem, misalkan volume mengecil maka dilakukan usaha pada sistem atau  $W$  bertanda negatif (-). Jika positif artinya panas diberikan kepada sistem,  $Q$  bertanda negatif jika panas keluar dari sistem.

### Hukum pertama termodinamika menyatakan:

*Panas yang ditambahkan pada suatu sistem sama dengan perubahan energi internal sistem ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem.*

$$Q = \Delta U + W \quad \dots \quad (11)$$

Kita telah mempelajari berbagai proses dan usaha tiap proses.

Untuk proses isobarik usaha yang dilakukan gas adalah  $W = P\Delta V$  maka hukum termodinamika pertama menjadi:

$$Q = \Delta U + P\Delta V \quad \dots \quad (12)$$

Pada proses isotermik usaha yang dilakukan gas adalah  $W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$ , karena suhu konstan maka energi dalam sistem juga konstan atau  $\Delta U = 0$ . Hukum termodinamika pertama menjadi:

$$Q = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots \quad (13)$$

Pada proses isokorik, usaha yang dilakukan gas adalah nol, maka  $Q = \Delta U$ . Dengan demikian semua kalor yang masuk digunakan untuk menaikkan tenaga dalam sistem.



### Contoh Soal 2

Sebuah sistem terdiri atas 4 kg air pada suhu  $73^\circ\text{C}$ , 30 kJ usaha dilakukan pada sistem dengan cara mengaduk, dan 10 kkal panas dibuang. (a) Berapakah perubahan tenaga internal sistem? (b) Berapa temperatur akhir sistem?

**Penyelesaian :**

**Diketahui :**

$$m = 4 \text{ kg}, T_1 = 73^\circ \text{ C} = 273 + 73 = 346 \text{ K}$$

**Jawab :**

Usaha yang dilakukan  $W = -30 \text{ kJ}$ , kalor yang keluar  $Q = -10 \text{ kkal} = 10 \times 4,18 \text{ kJ} = 41,8 \text{ kJ}$ .

Tenaga internal sistem adalah :

$$\Delta U = Q - W = -41,8 \text{ kJ} + 30 \text{ kJ} = -11,8 \text{ kJ}$$

Kalian masih ingat tentang kalor yang diperlukan untuk mengubah suhu sistem bukan?

$$Q = mc\Delta T$$

Karena  $Q$  bernilai negatif maka suhu menjadi turun.

$$\begin{aligned}\Delta T &= 11,8 \text{ kJ} / ((4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(1,5)) \\ &= 1,88^\circ\end{aligned}$$

Jadi, suhu akhir sistem adalah  $73 - 1,88 = 71,12^\circ \text{ C}$



### Keingintahuan : Mencari Informasi

Setelah mempelajari hukum pertama termodinamika, kalian tidak boleh puas sebelum mengetahui penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Sebutkanlah alat-alat yang menggunakan prinsip hukum termodinamika pertama ini.

## C. Kapasitas Kalor Gas

Kapasitas panas adalah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu zat sebesar 1 kelvin, sehingga dapat dituliskan sebagai:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad \dots \quad (14)$$

atau  $Q = C\Delta T$  satuan  $Q$  adalah Joule , satuan  $T$  adalah Kelvin sehingga satuan  $C$  adalah J/K.

Kita mengetahui proses perubahan suhu pada gas dapat terjadi pada tekanan tetap atau volume tetap. Sehingga kapasitas panas pada gas berupa kapasitas pada tekanan tetap dan kapasitas panas pada volume tetap.

Kapasitas panas pada tekanan tetap  $C_p$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhunya pada tekanan tetap.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \quad \dots \quad (15)$$

Kapasitas panas pada volume tetap  $C_v$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhunya pada volume tetap.

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} \quad \dots \quad (16)$$

Pada proses isokorik usaha yang dilakukan sistem adalah 0 karena tidak ada perubahan volume, maka menurut hukum termodinamika pertama  $Q_v = \Delta U$  sedang pada proses isobarik  $Q_p = \Delta U + W$  sehingga kita dapatkan:

$$Q_p - Q_v = W \quad \dots \quad (17)$$

atau

$$C_p\Delta T - C_v\Delta T = W = P\Delta V \quad \dots \quad (18)$$

$$\text{Kita dapatkan } C_p - C_v = \frac{P\Delta V}{\Delta T} = nR$$

$$C_p - C_v = nR \quad \dots \quad (19)$$

Kita dapatkan selisih kapasitas panas pada tekanan tetap dengan kapasitas panas pada volume tetap bernilai  $nR$  atau konstan.



Selain kapasitas panas kita mengenal kalor jenis. Kalor jenis  $c$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan 1 kg zat untuk menaikkan suhunya 1 K. Kaitan antarkalor jenis dengan kapasitas panas adalah:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{C}{m} \quad \dots \quad (20)$$

Kapasitas panas ada dua macam, maka kalor jenis juga ada 2 macam kalor jenis pada tekanan tetap dan kalor jenis pada volume tetap.

$$c_p = \frac{C_p}{m} \text{ dan } c_v = \frac{C_v}{m} \quad \dots \quad (21)$$

## D. Hukum Termodinamika Kedua dan Siklus Carnot

### 1. Mesin Kalor

Mesin kalor adalah suatu alat yang mengubah tenaga panas menjadi tenaga mekanik. Misalnya dalam mobil energi panas hasil pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi gerak mobil. Kalian tahu ada gas yang dibuang dari knalpot mobil disertai panas. Tidak semua energi panas dapat diubah menjadi energi mekanik, ada energi yang timbul selain energi mekanik. Contoh lain adalah mesin pembangkit tenaga listrik tenaga panas bumi yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Uap dialirkan melalui sebuah turbin sehingga turbin bergerak dan memutar generator sehingga timbul tenaga listrik.

Secara sistematis usaha mesin kalor adalah usaha yang dilakukan empat tahap secara siklis. Sebuah silinder berisi gas pada tekanan  $P_1$  dilengkapi dengan piston. Tahap-tahap yang dilakukan kemudian adalah:

- Piston dijaga pada volume konstan  $V_1$  kemudian tekanan  $P_1$  dinaikkan dengan cara melakukan pemanasan sehingga dicapai tekanan  $P_2$ . Tekanan akan bertambah dengan volume konstan. Usaha dari luar dikerjakan agar mengimbangi gaya pada piston yang bertambah karena penambahan tekanan.
- Pemanasan masih dilakukan. Semakin banyak panas yang ditambahkan, gas kemudian dibiarkan memuai

pada tekanan konstan,  $P_3=P_2$ . Volume bertambah dari  $V_2$  menjadi  $V_3$  sehingga mesin melakukan kerja.

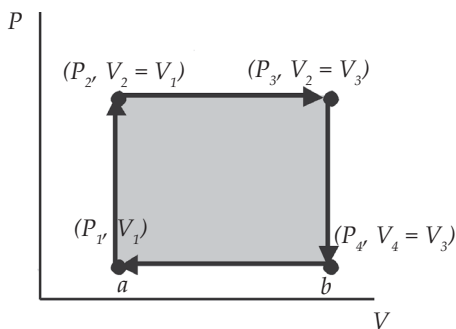
- c. Piston kemudian dijaga agar volumenya konstan sehingga tekanan turun kembali menjadi  $P_1$ . Tekanan akan berkurang dengan volume konstan sehingga tidak ada kerja yang dilakukan pada gas.
- d. Gas kemudian ditekan dengan tekanan konstan, dan panas dikeluarkan sampai volumenya kembali ke volume semula. Hasil total kerja adalah total kerja tiap proses a,b,c, dan d. Atau luas segiempat pada gambar .

Panas yang masuk :  $Q \text{ masuk} = Q_1 + Q_2$

Panas yang keluar:  $Q \text{ keluar} = Q_3 + Q_4$

Usaha yang dilakukan:

$$W = Q_{\text{masuk}} - Q_{\text{keluar}} \quad \dots \quad (23)$$



Tiap mesin kalor selalu ada zat atau sistem yang menyerap sejumlah panas  $Q_p$  pada suatu suhu yang tinggi, kemudian melakukan usaha sehingga tenaga kalor dirubah menjadi tenaga mekanik, dan membuang panas  $Q_d$  ke suhu rendah sehingga suhu turun dan kembali ke keadaan awalnya. Zat yang menyerap atau melepas panas disebut sebagai zat kerja. Tandon panas adalah sistem ideal dengan kapasitas panas yang

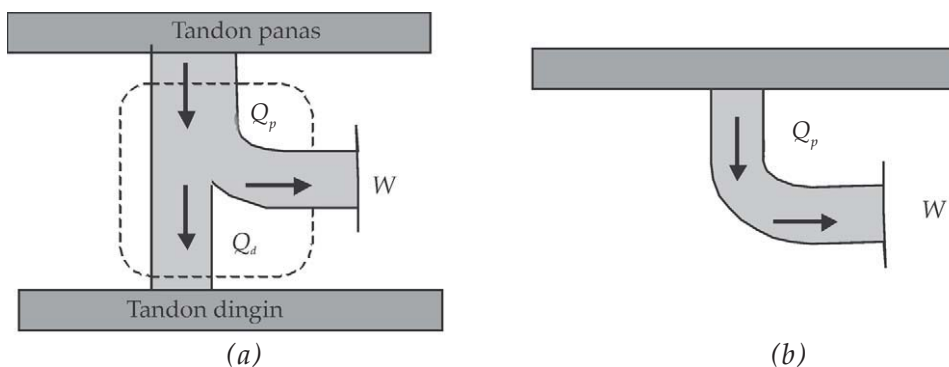
besar sehingga dapat menyerap atau memberikan panas tanpa perubahan suhu yang besar. Tandon panas biasanya berupa atmosfer atau keadaan luar.

Keadaan awal dan keadaan akhir mesin sama pada zat kerja yang sama, maka tenaga dalam akhir harus sama dengan tenaga dalam awalnya. Dengan demikian berdasarkan hukum termodinamik pertama kerja yang dilakukan sama dengan panas total yang diserap. Pada mesin panas kita mengharapkan dapat mengubah panas masukan  $Q_p$  menjadi kerja sebanyak mungkin.

$$W = Q_p - Q_d \quad \dots \quad (24)$$

### **Hukum termodinamika kedua untuk mesin panas**

*Mesin panas yang bekerja secara siklis tidak mungkin tidak menghasilkan efek lain selain menyerap panas dari tandon dan melakukan sejumlah usaha yang ekuivalen.*



**Gambar 9.5** Mesin pemanas: (a) mesin pemanas yang mungkin, (b) mesin pemanas ideal yang tidak mungkin terjadi menurut hukum termodinamika kedua.

Hukum termodinamika kedua menyatakan jika kita ingin menyerap energi dari suatu tandon panas untuk melakukan usaha maka kita harus menyiapkan tandon yang lebih dingin sebagai tempat untuk membuang tenaga. Karena mesin tidak mungkin membuat semua panas yang diserap menjadi tenaga tetapi pasti ada pembuangan. Hukum ini dirumuskan secara eksperimen oleh Kelvin dan Planck atau disebut juga rumusan panas untuk mesin panas.

## **2. Efisiensi**

Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara usaha yang dilakukan terhadap panas yang diserap pada tandon panas.

$$\eta = \frac{W}{Q_p} = \frac{Q_p - Q_d}{Q_p} = 1 - \frac{Q_d}{Q_p} \quad \dots \quad (25)$$

Efisiensi 100 % akan dicapai jika  $Q_d = 0$  atau tidak ada kalor yang dibuang pada tandon dingin. Seluruh kalor yang diserap diubah menjadi tenaga. Sedangkan menurut hukum termodinamika kedua hal ini tidak mungkin terjadi.



### Contoh Soal 3

Sebuah mesin panas menyerap panas 250 J dari tandon panas, kemudian melakukan usaha dan membuang 150 J panas ke tandon dingin. Berapa efesiensi mesin?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$Q_p = 250 \text{ J}, \quad Q_d = 150 \text{ J}$$

*Jawab :*

Efesiensi mesin

$$\eta = 1 - \frac{Q_d}{Q_p} = 1 - \frac{150}{250} = 1 - 0,6 = 0,4 \text{ atau } 40\%$$

Jadi, efesiensi mesin adalah 40%



### Wawasan Produktivitas : Inovatif/Kreatif

Kalian sudah pernah mempelajari efisiensi. Dalam contoh disebutkan bahwa efisiensi merupakan perbandingan antara usaha yang dilakukan terhadap panas yang diserap pada tandon panas. Nah, setelah kalian memahami hal itu, apa yang akan kalian lakukan? Buatlah langkah kerja yang sesuai dengan pengetahuan ini, yang bermanfaat bagi kehidupan manusia.

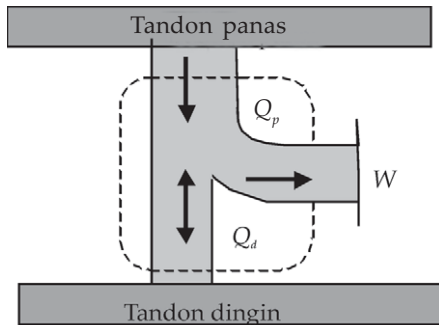
Hasilnya dikumpulkan kepada bapak/ibu guru kalian.

## 3. Refrigerator

Refrigerator adalah mesin panas yang kerjanya berlawanan dengan sistem panas di atas. Pada refrigerator usaha diberikan pada mesin untuk menyerap panas dari tandon dingin dan memberikan pada tandon panas. Skema kerja mesin pendingin atau refrigeror ditunjukkan pada Gambar (9.6). Kita mengusahakan sebanyak mungkin kalor  $Q_d$  yang dipindahkan dengan melakukan kerja sekecil mungkin.

### **Hukum termodinamika kedua untuk mesin pendingin**

*Sebuah refrigerator tidak mungkin bekerja secara siklis tanpa menghasilkan efek lain di luar serapan panas dari benda dingin ke benda panas.*



**Gambar 9.6** Prinsip kerja refrigerator untuk menyerap panas dari tandon dingin diperlukan usaha dari luar

Skema sebuah refrigerator ditunjukkan Gambar (9.6). Hukum kedua untuk refrigerator merupakan hasil perumusan Clausius. Berdasarkan hukum ini kita tidak mungkin mendinginkan rumah kita tanpa ada usaha yang dilakukan. Usaha dapat berasal dari listrik atau tenaga yang lain.

$$C_p = \frac{Q_d}{W} \quad \dots \quad (26)$$

Bila digunakan gas ideal sebagai zat kerja, kita bisa menyatakan koefisien performansi dengan suhu sebagai

$$C_p = \frac{Q_d}{Q_p - Q_d} = \frac{T_d}{T_p - T_d} \quad \dots \quad (27)$$

Semakin besar nilai  $C_p$  semakin baik refrigeratornya. Hukum kedua termodinamika untuk refrigerator menyatakan koefisien performansi tidak mungkin tak berhingga, karena  $W$  tidak mungkin nol.

Peralatan yang merupakan refrigerator misalnya lemari es dan pendingin ruangan. Pada lemari es, bagian dalam lemari es berlaku sebagai tandon dingin dan udara luar berlaku sebagai tandon panas. Lemari es mengambil kalor dari lemari es dan mengalirkan kalor ke udara sekitar lemari es. Agar lemari es dapat mengambil kalor diperlukan usaha, usaha pada lemari es berasal dari listrik. Tenaga listrik melakukan usaha sehingga kalor dapat mengalir dari tandon dingin ke tandon panas.

Contoh lain adalah pendingin ruangan. Bagian dalam ruangan berlaku sebagai tandon dingin dan bagian luar ruangan berlaku sebagai tandon panas. Mesin panas

mengalirkan panas dari tandon dingin ke tandon panas, atau dari dalam ruangan ke luar ruangan dengan melakukan usaha pada sistem. Usaha berasal dari tenaga listrik.

Hukum termodinamika kedua menunjukkan sifat alam kalor mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah. Andaikan mesin mengalirkan panas dari suhu tinggi ke suhu rendah maka mesin kita akan melakukan usaha. Jika mesin melakukan sistem yang siklis maka selalu ada kalor yang tidak menjadi usaha. Apabila mesin kita adalah mengalirkan kalor dari suhu rendah ke suhu tinggi maka kita harus melakukan usaha pada sistem agar kalor bisa mengalir.

## 4. Siklus Carnot

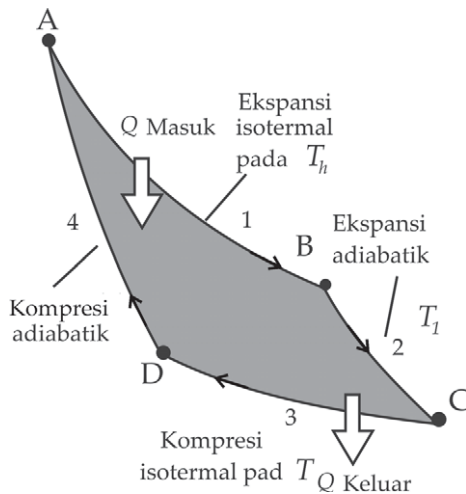
Kita telah mempelajari mesin panas dan mesin pendingin (refrigerator). Pada mesin panas kita tidak mungkin didapatkan efisiensi 100 %. Berapa efisiensi maksimum yang mungkin dicapai? *Sadi Carnot* (1796-1832) menyatakan:

### *Mesin Carnot*

*Tidak ada mesin yang bekerja di antara dua tandon panas yang tersedia yang dapat lebih efisien daripada mesin reversible yang bekerja di antara kedua tandon tersebut*

Untuk mengalirkan kalor dari tandon panas ke tandon dingin dikerahkan usaha. Carnot mengusulkan mesin kalor yang dapat bekerja secara siklis dan dapat balik atau reversibel. Suatu proses dikatakan dapat balik bila dapat kembali ke keadaan semula dengan lintasan yang sama, proses ini terjadi dengan tidak ada energi mekanik yang hilang karena gesekan, tidak ada hantaran panas karena beda suhu dan sistem selalu pada keadaan setimbang.

Siklus kerja mesin Carnot ditunjukkan pada Gambar (9.8). Proses yang terjadi berupa siklus yang disebut siklus Carnot.



Gambar 9.8 Skema proses siklus Carnot

### Keadaan 1 :

Siklus dimulai pada dari titik A. Proses dari titik A ke titik B dengan pemuaian isothermal pada suhu  $T_p$  tertentu, terjadi serapan panas. Panas diserap dengan proses isothermal sehingga proses dapat dibalik tanpa melanggar hukum kedua termodinamika. Tenaga dalam sistem tidak berubah. Sistem melakukan usaha ketika menuju ke titik B. Kalor yang diserap semua menjadi tenaga.

$$Q = W = Q_h = W = nRT_h \ln \frac{V_b}{V_a} \quad \dots (28)$$

### Keadaan 2

Proses dari titik B ke titik C adalah proses adiabatik, atau tidak terjadi pertukaran panas. Apabila prosesnya perlahan-lahan sehingga selalu setimbang proses ini juga reversibel. Suhu akan turun menjadi  $T_d$ .

### Keadaan 3

Dari titik C ke titik D terjadi proses pemampatan isothermal. Usaha dilakukan pada gas dan panas  $Q_d$  dilepas ke tandon dingin pada temperatur  $T_d$ . Usaha yang dilakukan adalah:

$$Q_d = nRT_d \ln \frac{V_c}{V_d} \quad \dots (29)$$

### Keadaan 4

Dari titik D kembali ke titik A terjadi proses pemampatan adiabatik, tidak ada kalor yang dilepas maupun diserap. Usaha dikerjakan pada sistem.

Usaha total adalah luasan di antara siklus tertutup (daerah yang diarsir). Efisiensi siklus ini adalah  $\eta = 1 - \frac{Q_d}{Q_p}$

Pada keadaan 2 dan 4 proses yang terjadi adalah proses adiabatik sehingga kita mendapatkan  $\left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma-1}$

$$\text{Sehingga } \frac{Q_d}{Q_p} = \frac{nRT_d \ln \frac{V_C}{V_D}}{nRT_p \ln \frac{V_B}{V_A}} = \frac{T_d}{T_p}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_d}{Q_p} = 1 - \frac{T_d}{T_p} \quad \dots \quad (30)$$

Efisiensi maksimum sebuah mesin panas adalah efisiensi mesin Carnot. Mesin yang memiliki efisiensi yang lebih besar dari mesin ini akan melanggar hukum termodinamika yang kedua.



#### Contoh Soal 4

Sebuah mesin uap bekerja di antara tandon panas 127 °C dan tandon dingin 0°C. Berapa efisiensi maksimum mesin ini?

**Penyelesaian :**

*Diketahui :*

$$T_p = 127^\circ\text{C} = 273 + 127 = 400 \text{ K}, \quad T_d = 0^\circ = 273 \text{ K}$$

*Jawab :*

Perhatikan satuan suhu dalam SI adalah K, jadi ubahlah selalu satuan dalam suhu menjadi Kelvin.

Efisiensi mesin Carnot

$$\eta = 1 - \frac{T_d}{T_p} = 1 - \frac{273}{400} = 0,32 \text{ atau } 32 \%$$

Jadi, efisiensi maksimum mesin adalah 32%

#### **Bagaimana cara kerja mesin bensin 4 tak**

Mari kita bahas mesin bensin 4 tak. Proses siklus mesin bensin 4 tak meliputi 4 tahap, tiap-tiap tahap adalah:



### **Tahap satu :**

Gerak masuk : piston ditarik ke bawah dari suatu posisi dekat bagian atas silinder. Gerakan ini biasanya dilakukan saat sedang dinyalakan dengan tenaga dari baterai yang menggerakkan stater. Saat piston bergerak ke bawah, maka katup masuk membuka. Tekanan udara dalam silinder menjadi berkurang sehingga bensin dan campuran udara yang berasal dari karburator melewati semprotan penghisap masuk ke silinder. Selama gerakan ini katup buang menutup dan poros engkol membuat gerakan setengah putaran.

### **Tahap kedua:**

Gerak menekan atau kompresi: Starter terus menerus memutar mesin. Katup masuk menutup dan piston bergerak ke atas. Kedua katup tertutup rapat selama gerak ini sehingga bahan campuran yang meledak ditekan menjadi  $\frac{1}{6}$  sampai  $\frac{1}{8}$  volumenya semula. Tekanan dalam silinder naik sampai kira-kira 7 kg per  $\text{cm}^2$ . Sekarang piston telah kembali ke posisinya semula yaitu dekat bagian atas silinder. Dengan demikian poros engkol membuat putaran secara sempurna.

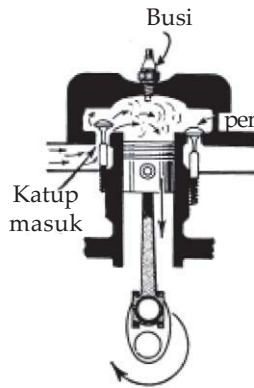
### **Tahap ketiga:**

Gerak tenaga: Sesaat sebelum piston mencapai bagian atas gerak kompresi, bahan bakar campuran menyala oleh percikan api yang berada di antara elektroda-elektroda busi pencetus. Sewaktu bahan bakar campuran meledak, maka dorongan gas itu ke bagian dasar silinder. Pada saat ledakan terjadi tekanan dalam silinder dapat melebihi 35 kg per cm. Gerak tenaga ini benar-benar menyebabkan mesin berjalan. Perhatikan bahwa kedua katup itu tetap tertutup sehingga piston mendapatkan tekanan penuh gas yang mengembang itu. Poros engkol telah membuat 1,5 putaran.

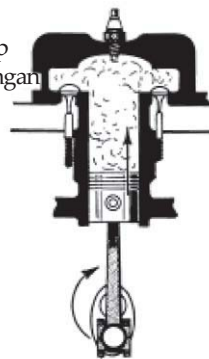
### **Tahap 4:**

Gerak pembuangan: Saat piston bergerak ke atas pada permulaan gerak ini, katup pembuangan membuka dan gas yang telah dipakai dikeluarkan melalui semprotan-semprotan buang, silinder bersih dari gas yang terbakar. Piston berada di posisi atas dan siap untuk memulai gerakan masuk. Pada akhir

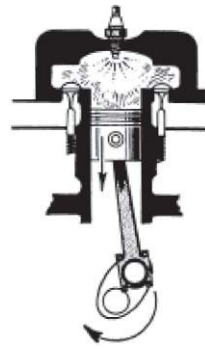
gerakan buangan poros engkol berputar 2 kali. Pada tiap putaran, terdapat 1 gerak tenaga pada setiap putaran poros engkol. Sebuah gaya roda logam yang besar ditempatkan pada ujung poros engkol. Inersia roda ini cenderung untuk menjaga agar mesin tetap berjalan terus.



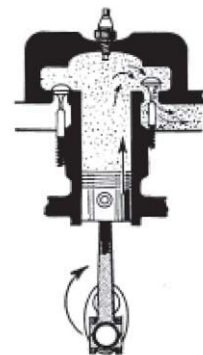
**Gambar 9.9** Gerak masuk



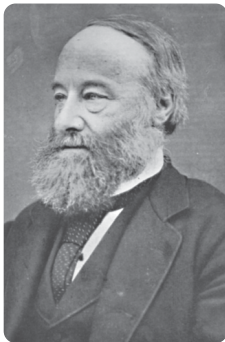
**Gambar 9.10** Gerak kompresi



**Gambar 9.11** Gerak tenaga



**Gambar 9.12** Gerak pembuangan



### Seputar Tokoh

James Prescott Joule (1818-1889)

Joule melakukan eksperimen yang untuk menentukan jumlah usaha yang diperlukan untuk menghasilkan kenaikan suhu tertentu pada sejumlah air tertentu. Joule juga melakukan eksperimen yang menunjukkan pada energi dalam gas ideal hanya berupa tenaga kinetik translasi.

Sumber: Wikipedia

## E. Entropi

Hukum kedua termodinamika menyatakan adanya proses irreversible atau tidak dapat balik. Proses reversibel sebenarnya menunjukkan adanya tenaga mekanis yang hilang. Semua proses reversibel menuju ke ketidakteraturan. Misalkan sebuah kotak berisi gas kemudian kotak menumbuk dinding secara tidak elastis. Gerak gas dalam kotak menjadi tidak teratur, sehingga suhu gas naik. Gas menjadi kurang teratur dan kehilangan kemampuan untuk melakukan usaha.

Besaran yang menunjukkan ukuran ketidakteraturan adalah entropi  $S$ . Entropi merupakan suatu fungsi yang tergantung pada keadaan sistem. Entropi suatu sistem berubah dari satu keadaan ke keadaan yang lain dengan definisi:

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{rev}}{T} \quad \dots \quad (31)$$

$dQ_{rev}$  adalah panas yang harus ditambahkan pada sistem dalam suatu proses reversibel untuk membawa dari keadaan awal ke keadaan akhirnya,  $dQ_{rev}$  bernilai positif (+) jika panas ditambahkan pada sistem dan bernilai negatif (-) jika panas diambil dari sistem.

Mari kita melihat entropi sistem pada berbagai keadaan. Mari kita tinjau zat yang dipanaskan pada tekanan tetap dari temperatur  $T_1$  menjadi temperatur  $T_2$ . Untuk menaikkan suhunya panas yang diserap adalah  $dQ$ . Kaitan antara  $dQ$  dengan perubahan suhunya adalah:

$$dQ = C_p dt \quad \dots \quad (32)$$

Hantaran panas antara dua sistem yang memiliki beda temperatur tertentu bersifat tak dapat balik atau irreversibel. Entropi merupakan fungsi keadaan jadi tidak tergantung pada proses. Maka perubahan entropi pada sistem adalah:

$$dS = \frac{dQ}{T} = C_p \frac{dT}{T}$$

atau

$$\Delta S = C_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \dots \quad (33)$$

Bila  $T_2 > T_1$  maka perubahan entropi positif, dan sebaliknya jika  $T_2 < T_1$  maka perubahan entropinya negatif.

Sekarang kita tinjau pemuaian reversibel pada suhu tetap suatu gas yang memiliki suhu  $T$  dari volume  $V_1$  sampai  $V_2$ . Karena suhu tetap maka tenaga internalnya nol dan  $Q = W$ . Usaha dilakukan gas dan panas diserap sistem dari tandon pada temperatur  $T$ . Perubahan entropi gas adalah:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dW}{T}$$

$$\Delta S = \int_{V_1}^{V_2} \frac{PdV}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRdV}{T} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots (34)$$

Jika  $V_2$  lebih besar daripada  $V_1$  maka perubahan entropi gas bernilai positif. Pada proses ini sejumlah panas  $Q$  meninggalkan tandon dan memasuki gas. Jumlah panas ini sama dengan usaha yang dilakukan oleh gas. Perubahan entropi gas adalah positif, karena  $Q=W$  positif, tetapi perubahan entropi tandon negatif karena  $Q$  negatif atau  $Q$  keluar dari tandon. Jadi total perubahan entropi gas dan tandon adalah nol. Sistem gas dan tandon kita katakan sebagai semesta. Semesta adalah sistem dan lingkungannya. Dengan demikian kita bisa mengambil kesimpulan

*Pada proses reversibel, perubahan entropi semesta adalah nol*

Bagaimana jika prosesnya tidak reversibel? Misalkan saja gas pada suhu  $T$  dan gas memuai secara bebas dari volume  $V_1$  menjadi  $V_2$ . Pada pemuaian bebas tidak ada usaha yang dilakukan dan tidak ada panas yang dipindah. Jadi kita biarkan gas memuai sendiri. Prosesnya tidak reversibel, maka kita tidak bisa menggunakan  $\int dQ/T$  untuk mencari perubahan entropi gas. Akan tetapi karena keadaan awal sama dengan keadaan akhir pada proses isothermal maka perubahan entropi untuk pemuaian bebas sama dengan perubahan entropi pada pemuaian isothermal. Maka perubahan entropi pada pemuaian bebas:

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots (35)$$

$V_2$  lebih besar dari  $V_1$  karena terjadi pemuaian bebas, maka perubahan entropi semesta untuk proses irreversibel bernilai positif, atau entropinya naik, maka kita bisa mengatakan pada proses irreversibel entropi semesta naik.

Bagaimana jika volume akhir lebih kecil dari volume mula-mula? Bila ini terjadi maka entropi semesta akan turun, akan tetapi hal ini tak mungkin terjadi karena gas tidak bisa secara bebas menyusut dengan sendirinya menjadi volume yang lebih kecil. Maka kita sekarang bisa menyatakan hukum termodinamika kedua menjadi untuk sembarang proses, entropi semesta tak pernah berkurang.



## Contoh Soal 5

### Soal Ebtanas 1999

Perhatikan pernyataan-pernyataan berikut ini.

- (1) Pada proses adiabatik, gas selalu melakukan usaha
- (2) Pada proses isotermik, energi dalam gas berubah
- (3) Pada proses isokorik, gas tidak melakukan usaha
- (4) Pada proses isobarik, gas melakukan/menerima usaha

Pernyataan yang sesuai dengan proses termodinamika adalah ....

- a. (1) dan (2)
- b. (1), (2), dan (3)
- c. (1) dan (4)
- d. (2), (3), dan (4)
- e. (3) dan (4)

### *Penyelesaian :*

Mari kita tinjau pernyataan di atas satu persatu.

- (1) Pada proses adiabatik, gas selalu melakukan usaha, pernyataan ini salah, pada proses adiabatik gas bisa melakukan usaha atau dilakukan usaha pada gas, jadi tidak selalu melakukan usaha.
- (2) Pada proses isotermik, energi dalam gas berubah, pernyataan ini salah, energi dalam tergantung pada suhunya, jika suhu konstan atau proses yang terjadi adalah proses isotermik, maka energi dalam juga tidak berubah.
- (3) Pada proses isokorik, gas tidak melakukan usaha, pernyataan ini benar, pada proses isokorik volume gas tetap sehingga gas tidak melakukan atau dilakukan usaha.
- (4) Pada proses isobarik, gas melakukan/menerima usaha, pernyataan ini benar, pada proses isobarik tekanan tetap, jika suhunya berubah maka volumenya akan berubah sehingga gas melakukan atau menerima usaha.

Jadi jawaban yang benar E



## Contoh Soal 6

### Soal SPMB 2002

Untuk gas ideal yang menjalani proses isothermal, jika  $Q$  = kalor,  $\Delta U$  = perubahan energi dalam dan  $W$  = usaha maka:

- A.  $Q = W$
- B.  $Q > w$
- C.  $C < W$
- D.  $Q = \Delta U$
- E.  $W = \Delta U$

#### Penyelesaian :

Pada proses isothermal, suhu konstan maka  $\Delta U=0$ ,

Hukum termodinamika pertama  $Q = \Delta U + W$

Jika  $\Delta U = 0$  maka  $Q = W$ , jawaban yang benar A.



## Ringkasan

### 1. Usaha yang dilakukan gas

Usaha yang dilakukan gas adalah

$W = \int P dV$  = luasan di bawah kurva  $P$  dengan  $V$

Usaha yang dilakukan gas tergantung pada proses yang terjadi.

Proses isobarik adalah proses dengan tekanan tetap.

Kerja yang dilakukan gas  $W = P\Delta V$

Proses isotermik adalah proses dengan suhu tetap. Kerja yang

dilakukan gas adalah  $W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$

Proses isokorik adalah proses dengan volume tetap.

Usaha yang dikerjakan adalah nol karena volumenya konstan. Semua

kalor yang masuk menjadi tenaga internal.

Proses adiabatik adalah proses perubahan keadaan gas tanpa disertai kalor yang masuk ataupun kalor yang keluar. Pada proses adiabatik berlaku  $PV^\gamma = \text{konstan}$  atau  $T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)}$

### 2. Hukum termodinamika pertama

Hukum termodinamika pertama menyatakan:

*Panas yang ditambahkan pada suatu sistem sama dengan perubahan energi internal (energi dalam) sistem ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem.*

$$Q = \Delta U + W$$

### 3. Kapasitas kalor gas

Kapasitas panas pada tekanan tetap  $C_p$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhunya pada tekanan tetap.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T}$$

Kapasitas panas pada volume tetap  $C_v$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhunya pada volume tetap.

$$C_p - C_v = nR$$

Kalor jenis  $c$  didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan 1 kg zat untuk menaikkan suhunya 1 K. Kaitan antar kalor jenis dengan kapasitas panas adalah:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{C}{m}$$

### 4. Hukum termodinamika kedua

Mesin kalor adalah suatu alat yang mengubah tenaga panas menjadi tenaga mekanik.

Mesin dingin adalah mesin kalor yang kerjanya berlawanan dengan mesin kalor.

Hukum termodinamika kedua untuk mesin panas menyatakan

Mesin panas yang bekerja secara siklis tidak mungkin tidak menghasilkan efek lain selain menyerap panas dari tandon dan melakukan sejumlah usaha yang ekuivalen.

Efisiensi mesin panas:

$$\eta = \frac{W}{Q_p} = 1 - \frac{Q_d}{Q_p}$$

Hukum termodinamika kedua untuk mesin dingin menyatakan

Sebuah refrigerator tidak mungkin bekerja secara siklis tanpa menghasilkan efek lain di luar serapan panas dari benda dingin ke benda panas.

Koefisien performansi mesin dingin:

$$Cp = \frac{Q_d}{W}$$

### 5. Siklus Carnot

Siklus Carnot meliputi siklus dari keadaan  $PV$  tertentu kemudian mengalami perubahan keadaan dengan proses pemuaian isotermik reversibel diikuti proses adiabatik dan proses pemampatan isotermik reversibel dan kembali ke keadaan semula dengan proses adiabatik.

Efisiensi mesin Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{Q_d}{Q_p} = 1 - \frac{T_d}{T_p}$$

Tidak ada mesin panas yang lebih efisien dari mesin Carnot tanpa melanggar hukum termodinamika kedua.

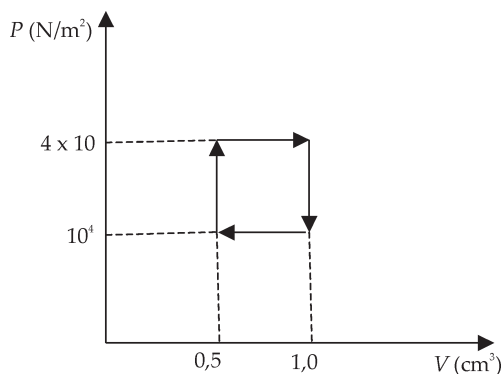


## Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

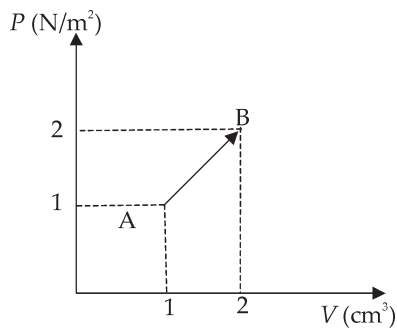
1. Sejumlah gas ideal dipanaskan pada tekanan tetap  $2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ , sehingga volumenya berubah dari  $20 \text{ m}^3$  menjadi  $30 \text{ m}^3$ . Usaha yang dilakukan gas selama pemanasan adalah ....  
A.  $10^5 \text{ J}$   
B.  $2 \times 10^5 \text{ J}$   
C.  $10^6 \text{ J}$   
D.  $2 \times 10^6 \text{ J}$   
E.  $10^7 \text{ J}$
2. Suatu mesin pendingin memiliki efisiensi 50%. Jika suhu tandon tinggi  $27^\circ\text{C}$ , maka tandon suhu rendah memiliki suhu ....  
A.  $-13^\circ\text{C}$   
B.  $-43^\circ\text{C}$   
C.  $-53^\circ\text{C}$   
D.  $-73^\circ\text{C}$   
E.  $-200^\circ\text{C}$



3. Sebuah mesin memiliki siklus seperti pada gambar. Usaha yang dilakukan adalah ....

A.  $0,5 \times 10^4 \text{ J}$   
B.  $10^4 \text{ J}$   
C.  $1,5 \times 10^4 \text{ J}$   
D.  $2 \times 10^4 \text{ J}$   
E.  $4 \times 10^4 \text{ J}$

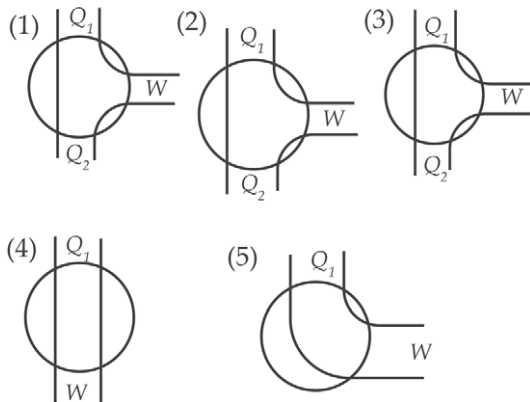




4. Gas ideal mengalami proses AB seperti gambar di samping. Jumlah kalor yang diserap selama proses AB adalah ....
- 0,5 J
  - 1,5 J
  - 3 J
  - 4,5 J
  - 6 J
5. Jika tandon suhu tinggi bersuhu 800 K, maka efisiensi maksimum mesin adalah 40%. Agar efisiensi maksimum naik menjadi 50%, suhu tandon suhu tingginya harus menjadi ....
- 960 K
  - 900 K
  - 1.000 K
  - 1.180 K
  - 1.600 K
6. Suatu mesin Carnot beroperasi dengan tandon yang suhunya  $T_1$  dan  $T_2$  dengan  $T_1 > T_2$ . Efisiensi mesin Carnot adalah ....
- $\frac{T_2 - T_1}{T_1}$
  - $\frac{T_2 - T_1}{T_2}$
  - $\frac{T_1 - T_2}{T_2}$
  - $\frac{T_1}{T_1 - T_2}$
  - $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$

7. Mesin Carnot mengambil 1.000 kkal dari tandon bersuhu  $627^{\circ}\text{C}$ , maka kalor yang dikeluarkan ke tandon rendah yang bersuhu  $27^{\circ}\text{C}$  adalah ....

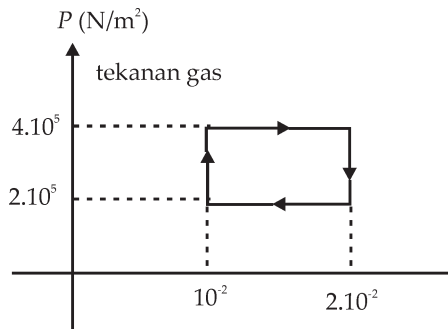
A. 43,1 kkal  
B. 333,3 kkal  
C. 600 kkal  
D. 666,7 kkal  
E. 956,9 kkal



8. Berikut ini adalah diagram beberapa mesin panas.

Jika kalor  $Q_1 > Q_2$  dan  $W$  = usaha, maka yang sesuai dengan mesin Carnot adalah ....

A. (1)  
B. (2)  
C. (3)  
D. (4)  
E. (5)



9. Usaha yang dilakukan sejumlah gas pada proses yang digambarkan pada grafik adalah ....

A.  $10^3$  J  
B.  $2 \times 10^3$  J  
C.  $10^4$  J  
D.  $2 \times 10^4$  J  
E.  $10^5$  J

10. Proses perubahan wujud adalah proses (SPMB 2002) ....

A. adiabatik dan isothermal  
B. adiabatik dan isobarik  
C. isobarik dan isothermal  
D. isokorik dan isothermal  
E. isokorik dan isobarik

11. Perhatikan pernyataan-pernyataan berikut!

(1) Pada proses adiabatik, gas selalu melakukan usaha  
(2) Pada proses isotermik, energi dalam gas berubah  
(3) Pada proses isokhorik, gas tidak melakukan usaha  
(4) Pada proses isobarik, gas melakukan/menerima usaha

Pernyataan yang sesuai dengan proses termodinamika adalah ....

- A. (1) dan (2)
- B. (1), (2), dan (3)
- C. (1) dan (4)
- D. (2), (3) dan (4)
- E. (3) dan (4)

**B. Kerjakan soal di bawah ini!**

1. 400 kkal ditambahkan pada gas yang memuai dan gas melakukan usaha 800 kJ. Berapakah perubahan energi internal gas?
2. Di air terjun Grojogan Sewu air jatuh dari ketinggian 50 m. Jika energi potensial berubah menjadi energi internal air. (a) Hitunglah kenaikan temperaturnya! (b) Lakukan hal yang sama untuk air terjun dengan ketinggian 740 m!
3. Gas dibiarkan memuai pada tekanan konstan sampai volumenya 3 l, kemudian gas didinginkan pada volume konstan sampai tekanannya 2 atm. (a) Tunjukkan proses ini dengan diagram *PV*! (b) Hitung usaha yang dilakukan oleh gas! (c) Hitung panas yang ditambahkan selama proses ini!
4. Gas dibiarkan memuai pada suhu konstan sampai volumenya 3 l dan tekanannya 1 atm. Kemudian gas dipanaskan pada volume konstan sampai tekanannya 2 atm. (a) Buatlah diagram *PV* untuk tiap proses. (b) Hitung usaha yang dilakukan gas. (c) Hitung panas yang ditambahkan selama proses.
5. Satu mol gas ideal monoatomik mula-mula berada pada 273 K dan 1 atm. (a) Berapa tenaga internalnya mula-mula? Hitung energi internal akhir dan usaha yang dilakukan oleh gas bila 500 J panas ditambahkan (b) Pada tekanan konstan (c). Pada volume konstan.



## Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. usaha,
2. hukum pertama termodinamika,
3. kapasitas kalor gas,
4. hukum termodinamika kedua dan siklus Carnot, dan
5. entropi.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali untuk persiapan ulangan akhir semester.



## Uji Kompetensi Akhir Semester 2

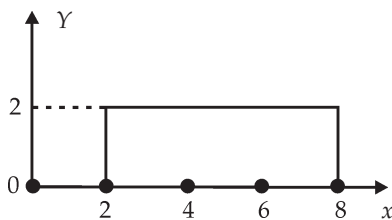
Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

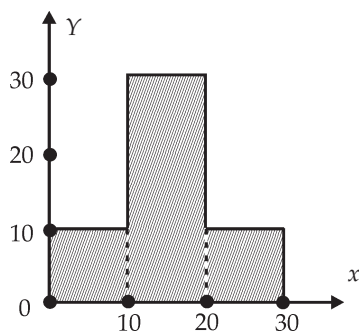
1. Sebuah benda bergerak dengan percepatan konstan yaitu  $a \text{ m/det}^2$ , maka pernyataan di bawah ini yang **tidak benar** adalah ....
  - A. kecepatan rata-rata benda sama dengan rata-rata kecepatan benda
  - B. kecepatan sesaat benda sama dengan kelajuan rata-rata benda
  - C. percepatan benda sama dengan percepatan rata-rata benda
  - D. percepatan benda sama dengan kecepatan akhir dikurangi kecepatan awal dibagi waktu total
  - E. setiap detik kecepatan benda berubah sebesar  $a \text{ m/det}$ .
2. Pada gerak melingkar dengan kelajuan konstan dan jari-jari konstan percepatan tangensial selalu ....
  - A. menuju pusat lingkaran
  - B. tegak lurus dengan kecepatan tangensial
  - C. merubah besar kecepatan
  - D. merubah arah kecepatan
  - E. besar percepatan tangensial konstan
3. Sebuah planet bermassa  $M$  dikelilingi oleh satelit bermassa  $M_a$ ,  $M_b$ , dan  $M_c$ . Satelit A berjari-jari  $R_a$ , satelit B berjari-jari  $R_b$ , dan satelit C berjari-jari  $R_c$ . Jika  $3 M_a = 2 M_b = M_c$  dan  $r_a = 2r_b = 3r_c$  maka medan gravitasi yang dialami oleh kedua satelit tersebut ....
  - A. medan gravitasi yang dialami satelit A lebih besar dari satelit B
  - B. medan gravitasi yang dialami satelit A lebih kecil dari satelit B
  - C. medan gravitasi yang dialami satelit A sama dengan satelit B
  - D. medan gravitasi yang dialami satelit A lebih besar dari satelit C
  - E. medan gravitasi yang dialami satelit B lebih besar dari satelit C

4. Dua buah pegas masing-masing memiliki konstanta pegas 30 N/m dan 50 N/m. Jika kedua pegas tersebut disusun secara seri maka susunan tersebut menghasilkan konstanta pegas sebesar ....  
 A. 0,014 N/m  
 B. 0,053 N/m  
 C. 18,75 N/m  
 D. 30 N/m  
 E. 70 N/m
5. Energi potensial yang dimiliki oleh kedua buah planet yang bermassa  $M_a$  dan  $M_b$  yang dipisahkan oleh jarak sebesar  $R$  adalah ....  
 A. berbanding terbalik dengan  $M_a$   
 B. berbanding terbalik dengan  $M_b$   
 C. sebanding dengan  $R$   
 D. berbanding terbalik dengan  $R$   
 E. berbanding terbalik dengan  $R^2$
6. Sebuah mobil bertubrukan dengan sebuah truk. Bila kecepatan mula-mula kedua kendaraan tersebut sama dan berlawanan arah. Setelah tubrukan keduanya diam. Pada tubrukan tersebut berlaku ....  
 A. hukum kekekalan momentum  
 B. hukum kekekalan tenaga kinetik  
 C. hukum kekekalan momentum dan kekekalan tenaga kinetik  
 D. hukum kekekalan tenaga mekanik  
 E. hukum kekekalan momentum dan kekekalan tenaga mekanik

7. Koordinat titik berat bidang pada gambar di samping adalah ....

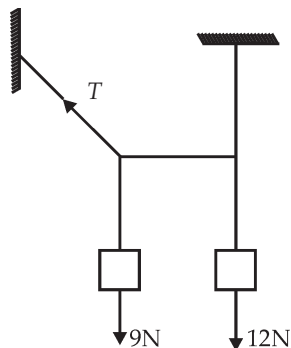


- A. (1,2)
- B. (1,5)
- C. (3,1)
- D. (5,1)
- E. (5,0)



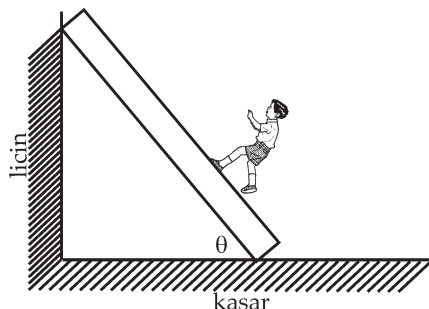
8. Koordinat titik berat bidang di samping adalah ....

- A. (15,11)
- B. (17,15)
- C. (17,11)
- D. (15,7)
- E. (11,7)



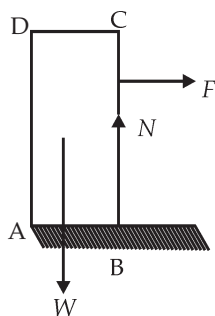
9. Berapa tegangan pada keadaan setimbang ....

- A. 3 N
- B. 9 N
- C. 12 N
- D. 15 N
- E. 21 N



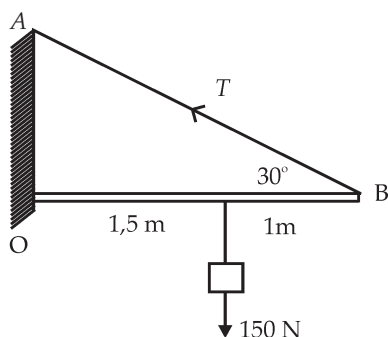
10. Seseorang naik tangga homogen yang disandarkan pada dinding vertikal yang licin. Berat tangga 300 N dan berat orang 700 N. Bila orang tersebut dapat naik sejauh 3 m sesaat sebelum tangga itu menggelincir, maka koefisien gesek antara lantai dan tangga adalah ....

- A. 0,38
- B. 0,48
- C. 0,85
- D. 0,43
- E. 0,56



11. Balok ABCD terletak pada lantai kasar yang koefisien gesek statisnya 0,4.  $AB=4$  m dan  $BC=10$  m. Massa balok 100 kg dan  $g=10$  m/det<sup>2</sup>. Besar gaya  $F$  maksimum dan letak titik tangkap gaya agar balok cepat menggeser dan mengguling adalah ....

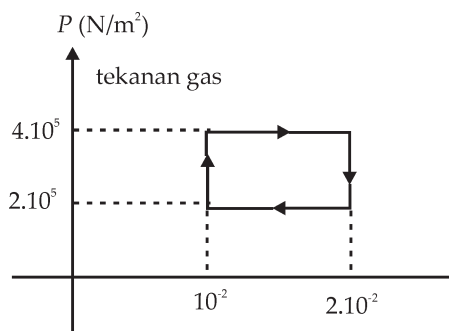
- A. 200 N di C
- B. 200 N di tengah-tengah BC
- C. 400 N di tengah-tengah BC
- D. 400 N di C
- E. 400 N di B



12. Sebuah benda dengan berat 150 N digantungkan pada kawat AB dan batang OA yang massanya diabaikan. Jika antara kawat dan batang membentuk sudut  $30^\circ$ , maka besar tegangan tali T agar batang setimbang adalah ....
- 50 N
  - 75 N
  - 30 N
  - 60 N
  - 1.180 N
13. Di dalam ruangan yang bervolume 3 liter terdapat 400 miligram gas dengan tekanan 1 atmosfer. Jika 1 atmosfer sama dengan  $10^5 \text{ N/m}^2$ , maka kelajuan rata-rata partikel gas tersebut adalah ....
- $1,5 \times 10^2 \text{ m/det}$
  - $1,5 \times 10^3 \text{ m/det}$
  - $2,25 \times 10^3 \text{ m/det}$
  - $3 \times 10^3 \text{ m/det}$
  - $9 \times 10^3 \text{ m/det}$
14. Sebuah balon dengan diameter 10 m berisi udara panas. Kerapatan udara di dalam balon 75 % kerapatan udara luar (kerapatan udara luar  $1,3 \text{ kg/m}^3$ ). Besar massa total penumpang dan beban yang masih dapat diangkut balon tersebut ( $g=10 \text{ m/det}^2$ ) ....
- nol
  - 1,3 kg
  - 170 kg
  - 510 kg
  - 680 kg
15. Tekanan gas dalam ruang tertutup
- (1) sebanding dengan kecepatan rata-rata partikel gas
  - (2) sebanding dengan energi kinetik rata-rata partikel gas
  - (3) tidak bergantung pada banyaknya partikel gas
  - (4) berbanding terbalik dengan volume gas.
- Pernyataan yang benar adalah ....
- (1),(2),(3)
  - (1),(2),(3),(4)
  - (1),(3)
  - (2),(4)
  - (4)



16. Air mengalir pada suatu pipa yang diameternya berbeda dengan perbandingan 1:2. Jika kecepatan pada bagian pipa yang besar sebesar 40 m/det, maka besarnya kecepatan air pada bagian pipa yang kecil sebesar ....
- 20 m/det
  - 40 m/det
  - 80 m/det
  - 120 m/det
  - 160 m/det
17. Perhatikan pernyataan-pernyataan berikut!
- (1) Pada proses adiabatik, gas selalu melakukan usaha
  - (2) Pada proses isotermik, energi dalam gas berubah
  - (3) Pada proses isokhorik, gas tidak melakukan usaha
  - (4) Pada proses isobarik, gas melakukan/menerima usaha
- Pernyataan yang sesuai dengan proses termodinamika adalah ....
- (1) dan (2)
  - (1), (2), dan (3)
  - (1) dan (4)
  - (2), (3) dan (4)
  - (3) dan (4)
18. Suatu mesin kalor Carnot dengan efisiensi 60%, dioperasikan antara 2 reservoir kalor, resevoir bersuhu rendah  $27^{\circ}\text{C}$ . Agar mesin carnot tersebut daya gunanya menjadi 80% maka diperlukan kenaikan suhu resevoir kalor tinggi sebesar ....
- 50 K
  - 150 K
  - 250 K
  - 500 K
  - 750 K



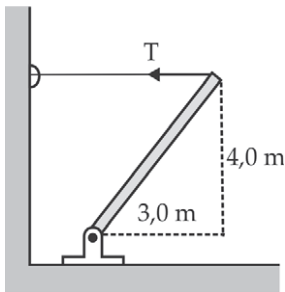
19. Usaha yang dilakukan sejumlah gas pada proses yang digambarkan pada grafik di samping adalah ....
- $10^3 \text{ J}$
  - $2 \times 10^3 \text{ J}$
  - $10^4 \text{ J}$
  - $2 \times 10^4 \text{ J}$
  - $10^5 \text{ J}$

20. Sejumlah  $n$  mol gas ideal monokromatik mula-mula tekanan dan volumenya  $P$  dan  $V_1$ , lalu dinaikkan pada tekanan tetap hingga volumenya menjadi  $V_2 = 2V_1$ , maka
- (1)  $T_2 = 2T_1$
  - (2) Energi kinetik rata-rata partikelnya menjadi dua kali semula
  - (3) Energi dalam sistem menjadi dua kali semula
  - (4)  $T_1V_1 = T_2V_2$

**B. Kerjakan soal di bawah ini!**

1. Sebuah bola menggelinding tanpa selip menuruni sebuah bidang miring dengan sudut  $\theta$ . Carilah:
  - (a) Percepatan bola,
  - (b) Gaya gesekan,
  - (c) Sudut maksimum bidang miring agar bola menggelinding tanpa selip dan nyatakan dalam koefisien gesekan  $M_s$ .
2. Sebuah cakram uniform memiliki jari-jari 12 cm dan memiliki massa 5 kg diputar sedemikian sehingga berputar secara bebas mengelilingi sumbunya. Sebuah tali yang dililitkan mengelilingi cakram ditarik dengan gaya 20 N.
  - (a) Berapakah torsi yang dikerjakan pada cakram?
  - (b) Berapakah percepatan sudut cakram?
  - (c) Jika cakram mula-mula diam, berapakah kecepatan sudutnya setelah 3 detik?
  - (d) Berapakah energi kinetiknya setelah 3 detik?
  - (e) Carilah sudut total yang ditempuh cakram selama 3 detik!
3. Sebuah roda yang dipasang pada suatu sumbu yang tidak licin mula-mula dalam keadaan diam. Sebuah torsi eksternal konstan 50 N/m diberikan pada roda selama 20 detik. Pada akhir detik ke 20 roda memiliki kecepatan sudut 600 putaran tiap detik. Torsi eksternal kemudian dipindahkan dan roda berhenti setelah lebih dari 120 det.
  - (a) Berapakah momen inersia roda?
  - (b) Berapakah torsi gesekan yang diasumsikan konstan?

4. Sistem pada gambar 8.61 dilepaskan dari keadaan diam. Balok bermassa 30 kg berada 2 m di atas lantai. Katrol adalah cakram uniform dengan jari-jari 10 cm dan massanya 5 kg. Carilah:
- kelajuan balok 30 kg itu tepat sebelum menyentuh lantai,
  - kelajuan sudut katrol pada saat itu,
  - tegangan tali, dan
  - waktu yang dibutuhkan balok 30 kg itu untuk mencapai lantai. Asumsikan tali tidak selip.



5. Sebuah tiang uniform yang panjangnya 5 m dan mempunyai massa total 150 kg dihubungkan ke tanah oleh sebuah engsel di dasarnya dan ditopang oleh kopel horisontal seperti yang ditunjukkan pada gambar di samping.
- Berapakah tegangan kabel?
  - Bila kabel putus, berapakah percepatan sudut tiang pada saat kabel diputus?
  - Berapakah kelajuan sudut tiang ketika dalam posisi horisontal?
6. Sebuah mesin atwood memiliki dua benda bermassa  $m_1 = 500$  g dan  $m_2 = 510$  g, yang dihubungkan oleh tali yang massanya dapat diabaikan dan melewati katrol yang licin. Katrol adalah cakram uniform dengan massa 50 g dan berjari-jari 4 cm. Tali tidak selip pada katrol.
- Carilah percepatan benda-benda!
  - Berapa tegangan tali yang menahan  $m_1$ , berapa tegangan tali yang menahan  $m_2$ ?
7. Air mengalir dengan laju 3 m/det dalam pipa horizontal pada tekanan 200 kPa. Pipa mengecil menjadi separo diameter semula.
- Berapa kelajuan aliran di bagian yang sempit?
  - Berapakah tekanan di bagian yang sempit?
  - Bagaimana perbandingan laju aliran volume di kedua bagian tersebut?

8. Sebuah tanki air yang besar dilubangi sejauh  $h$  di bawah permukaan air oleh pipa kecil seperti yang ditunjukkan pada gambar (11.29). Carilah jarak  $x$  yang dicapai oleh air yang mengalir keluar pipa!
9. Hidrometer adalah alat untuk mengukur kerapatan cairan. Bola berisi butiran-butiran timah. Volume bola 20 mL, batang panjangnya 15 cm dan memiliki diameter 5,00 mm dan massa gelas 6 gram.
  - (a) Berapa massa butiran timah yang harus ditambahkan agar kerapatan cairan terkecil yang dapat diukur adalah 0,9 kg/L?
  - (b) Berapakah kerapatan cairan maksimum yang dapat diukur?
10. Sebuah tabung yang dilengkapi dengan sebuah piston berisi 1 mol gas. Tekanan dan temperatur mula-mula adalah 2 atm dan 300 K. Gas dibiarkan memuai pada temperatur konstan sampai tekanan 1 atm. Gas kemudian ditekan dan pada saat yang sama dipanaskan sampai kembali ke volume semula, dan pada saat itu tekanannya adalah 2,5 atm. Berapakah temperatur akhir?
11. Oksigen ( $O_2$ ) ditempatkan dalam wadah kubus, yang sisinya 15 cm, pada temperatur 300 K. Bandingkanlah energi kinetik rata-rata molekul gas terhadap perubahan energi potensial gravitasi jika jatuh dari bagian atas wadah kedasaranya.
12. Satu mol gas ideal monoatomik mula-mula berada pada 273 K dan 1 atm.
  - (a) Berapa tenaga internalnya mula-mula? Hitung energi internal akhir dan usaha yang dilakukan oleh gas bila 500 J panas ditambahkan,
  - (b) Pada tekanan konstan, dan
  - (c) Pada volume konstan.
13. Gas Helium sebanyak 1,5 mol memuai secara adiabatik dari tekanan awal 5 atm dan temperatur 500 K sampai tekanan akhir 1 atm. Carilah:
  - (a) Temperatur akhir,
  - (b) Volume akhir,
  - (c) Usaha yang dilakukan gas, dan
  - (d) Perubahan tenaga internal gas.



# Daftar Pustaka

- Abdul Muis, ST, 2006. *Perang Siasat Fisika Praktis*, Jakarta : Kreasi Wacana.
- Grolier International, 2004. *Ilmu Pengetahuan Populer*, Jakarta : Widyadara.
- Halliday. D, Resnick.R, Walker. J, 1997. *Fundamental of Physics Extended*, edisi 5, John Willet and Sons, Inc.
- Hewit.G.P, 1993. *Conceptual Physics*, edisi 7. Harper Collins College Publisher.
- Nordling C. dan Osterman J. 1987, *Physics Handbook, Student Edition*, Hartwell Bratt Ltd., Lud: Sweden.
- Tipler.P, *Fisika untuk Sains dan Teknik, Edisi ketiga*. Jakarta : Erlangga.
- Frederick J. Bueche, Ph.D.1999. *Teori dan Soal-soal Fisika*. Terjemahan Drs. B. Darmawan, M.Sc. Jakarta : Erlangga.



## Lampiran:

# Glosarium

Adiabatik	: Suatu proses perubahan keadaan gas tanpa ada tenaga yang masuk atau yang keluar.
Amplitudo	: Simpangan terbesar dari ukuran yang ditinjau.
Daya	: Laju usaha atau kecepatan perubahan usaha, dirumuskan $D = \frac{dw}{dt} = \frac{J}{s} = Watt$
Elastisitas	: Substansi yang teratur memenuhi Hukum Hooke, ini berarti bila benda dikenai gaya akan berubah bentuk dan bila gaya dihilangkan maka akan kembali ke bentuk semula (lentur).
Energi	: Kemampuan untuk melakukan usaha.
Energi Internal (energi dalam):	Jumlah energi (energi kinetik translasi, rotasi dan vibrasi serta energi potensial listrik) yang dimiliki oleh seluruh molekul gas dalam wadah tertentu.
Entropi	: Besaran yang menunjukkan ketidakteraturan gerak suatu gas (s).
Frekuensi	: Jumlah siklus gerakan periodik dalam satuan waktu, satuannya Hertz (Hz).
Gerak	: Suatu benda dikatakan bergerak apabila kedudukannya senantiasa berubah terhadap suatu titik acuan tertentu.
Gaya	: Massa dikalikan percepatan benda.
Gravitasi	: Gaya tarik menarik antara massa.
Gravitasi Newton	: Teori yang menghubungkan gerakan benda di bumi (seperti peristiwa apel jatuh) dan gerakan benda di langit.
Gas ideal	: Adalah gas yang memenuhi asumsi-asumsi sebagai berikut : <ol style="list-style-type: none"><li>1. terdiri dari partikel-partikel yang disebut molekul-molekul yang identik,</li><li>2. molekul gas bergerak secara acak memenuhi Hk. Gerak Newton,</li><li>3. jumlah molekul gas sangat banyak tetapi tidak terjadi interaksi antarmolekul,</li><li>4. ukuran molekul gas sangat kecil sehingga dapat diabaikan terhadap wadah,</li></ol>



	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. molekul gas terdistribusi merata pada seluruh ruangan, dan</li> <li>6. setiap tumbukan yang terjadi adalah elastis sempurna.</li> </ol>
Hukum Keppler	<p>: Mempelajari tentang gerak planet. Hukum Kepler ada 3 :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. semua planet bergerak dalam orbit elips dengan matahari di salah satu fokusnya.</li> <li>2. garis yang menghubungkan tiap planet ke matahari menyapu luasan yang sama dengan waktu yang sama.</li> <li>3. kuadrat periode tiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dari matahari.</li> </ol>
Hukum Hooke	<p>: Hooke mengatakan : Jika benda lentur seperti karet ditarik atau ditekan, perubahan bentuknya sebanding dengan gaya yang bekerja selama masih berada dalam batas kelenturan.</p>
Hukum Kekekalan Energi	<p>: Energi total sebuah sistem dan lingkungannya tidak akan berubah, tetapi hanya terjadi perubahan bentuk.</p>
Hukum Kekekalan Momentum Sudut	<p>: Apabila tidak ada gaya dari luar sistem maka momentum sudut total sistem adalah kekal, atau tidak berubah.</p>
Hukum Kekekalan Momentum	<p>: Bila gaya total yang bekerja pada suatu sistem adalah nol, maka momentum total sistem tersebut adalah kekal.</p>
Impuls	<p>: Hasil kali antara gaya konstan <math>F</math> dengan interval waktu <math>\Delta t</math></p>
Inersia	<p>: Kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaannya.</p>
Isokorik	<p>: Suatu proses perubahan keadaan gas di mana nilai volumenya tetap.</p>
Isobarik	<p>: Suatu proses perubahan keadaan gas di mana nilai tekanannya tetap.</p>
Isothermal	<p>: Suatu proses perubahan keadaan gas di mana nilai suhunya dibuat tetap.</p>

Joule	: Satuan energi jika gaya 1 Newton berpindah 1 meter, perpindahan energi (usaha) yang terjadi adalah 1 joule. (diambil dari nama James Joule (1818-1899)).
Jarak	: Panjang lintasan yang ditempuh suatu benda tanpa memerhatikan arah gerak benda.
Kelajuan	: Jarak yang ditempuh ( $s$ ) dibagi waktu yang diperlukan selama gerakan ( $t$ ).
Kecepatan	: Besaran yang menyatakan nilai kelajuan dan arahnya.
Kecepatan linear	: Gerak suatu benda dengan percepatan konstan.
Kecepatan sesaat	: Kecepatan suatu benda pada waktu $t$ tertentu.
Kecepatan rata-rata	: Perpindahan dibagi selang waktu : $\frac{\Delta x}{\Delta t}$
Konstanta pegas	: Menunjukkan perbandingan antara gaya ( $F$ ) dengan renggangan ( $x$ ) pada suatu pegas; menunjukkan nilai batas renggangan suatu pegas.
Koefisien Restitusi	: Ukuran keelastisan suatu benda, simbol $e$ , rumus: $e = \frac{\text{kecepatan relatif setelah tumbukan}}{\text{kecepatan relatif sebelum tumbukan}}$
Kesetimbangan	: Suatu keadaan di mana benda tidak mengalami gerak ataupun rotasi.
Kinetika Gas	: Gas ideal bergerak secara acak mematuhi hukum Newton dan bertumbukan dengan molekul lain maupun dinding bejana tempat gas berada secara elastis sempurna.
Kapasitas Kalor	: Kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu zat sebesar 1 Kelvin. $C = \frac{Q}{\Delta T} \quad C = \text{kapasitas panas (J/K)}$ $Q = \text{kalor (J)}$ $\Delta T = \text{perubahan suhu (K)}$
Linear	: Konstan, tetap
Medan gravitasi	: Gaya gravitasi tiap satuan massa; Daerah atau ruangan di sekitar benda yang masih dipengaruhi gaya tarik (gravitasi) benda tersebut.
Momentum	: Hasil kali massa ( $m$ ) dan kecepatan ( $v$ )
Momen inersia	: Ukuran inersia suatu benda pada gerak rotasi.
Momentum sudut	: Hasil perkalian silang antara vektor $\mathbf{r}$ (gerak sumbu) dan momentum linear ( $\mathbf{p}$ ); $L = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$

Menggelinding	: Gerak gabungan antara gerak rotasi dan gerak translasi.
Massa molar	: Massa 1 mol zat, simbol $M$
Massa kalor	: Alat yang merubah tenaga panas menjadi tenaga mekanik.
Modulus	: Perbandingan antara tegangan dan regangan.
Osilasi	: Gerak bolak-balik benda di sekitar titik kesetimbangan.
Perpindahan	: Perubahan kedudukan suatu benda ditinjau dari keadaan awal dan keadaan akhir dengan memperhatikan arah gerak benda.
Periode	: Waktu yang diperlukan dalam satu kali melakukan getaran.
Regangan	: Perubahan panjang per panjang benda ( $\frac{\Delta L}{L}$ )
Sistem konservatif	: Suatu sistem yang mempunyai energi mekanik yang selalu kekal. (tidak tergantung pada panjang lintasan) misalnya : pegas.
Tegangan	: Perbandingan antara gaya $F$ yang dikenakan terhadap luasan penampang $A$ .
Teorema Usaha Energi	: Menyatakan usaha total yang dilakukan sebuah partikel sama dengan perubahan energi kinetik partikel.
Tumbukan	: Terjadi bila dua buah benda saling mendekati dan berinteraksi dengan kuat kemudian saling menjauh.
Torsi	: Kemampuan gaya untuk membuat benda melakukan gerak rotasi.
Teorema Elispartisi	: Tiap derajat kebebasan memiliki energi rata-rata sebesar $\frac{1}{2} kT$ untuk tiap molekul atau $\frac{1}{2} RT$ tiap mole gas, bila zat benda dalam kesetimbangan.
Usaha	: Hasil kali antara komponen gaya yang sejenis dengan besarnya perpindahan.

## Indeks Subjek

### A

adiabatik 268,273,310,314  
amplitudo 107,151

### D

daya 83,104,105,109,110,177,225,232,  
debit 109,222,224,225

### E

energi 9,81,82,83,88,91,97,98,103,104,105,106,  
107, 108,109,110,114,138,139,140,144,145,146,147,  
190, 251,253,254,255,256,257,258,260,261,262, 266,  
227,269,274,277,279,282,287,288,289,292,293, 300,  
301,302,304, 310,311,313,314,315  
energi internal 256,260,269,274,289,292,293,304  
energi kinetik 82,83,91,97,104,106,138,190,252,253,  
255,256,257,300,304,310,313  
energi mekanik 82,83, 105,144,277,282,313  
energi potensial 49,83,97,98,105,107,109,144,146,147,  
255,256,257,292,304,310  
entropi 268,285,310,314

### F

frekuensi 145,151,189  
gaya 36,39,40,41,42,43,44,45,46,49,50,81,82,83,84,85,  
86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,97,99,100,101,102,103,104,  
106,107,108,109,117,118,119,120,121,122,126,134,136,137,  
138,139,145,146,150,152,153,155,156,157,158,159,  
160,161,162,170,171,173,174,175,176,177,181,182,183,184,185,  
186,190,191,200,201,202,204,207,208,210,211,212,214,209,  
215,216,217,218,219,220,221,226,227,237,238,239,  
249,250,251,257, 272,273,277,284,299,302,307,310,  
311,312,313  
gaya gravitasi 36,39,40,45,43,45,85,86,  
90,91,95,97,99,101,102,145,177,181,199,250  
gaya sentripetal 43,45,46,145  
gerak jatuh bebas 132  
gerak parabola 161  
gravitasi 35,36,37,39,40,41,42,43,45,46,49,50,85,  
86,90,91,95,97,98,99,101,102,104,105,120,144,145,147,150,  
162,177,179,181,186, 199,210,219,236,250,297,304,  
312,314

### H

hukum Archimedes 208,209,213  
hukum kekekalan energi 105  
hukum kekekalan momentum sudut 129,177,196  
hukum Kepler 37  
hukum Pascal 198,207,238

### I

impuls 115,116,117,118,120,121,134,250  
isobarik 269,271,273,274,276,287,288,289,292,301  
isokorik 269,272,273,274,276,287,288,289,292  
isotermik 269,271,273,287,288,289,290,292,301

### K

kapasitas kalor 269,296  
kapilaritas 198,218  
kecepatan linear 155,164,175,177,180  
kecepatan rata-rata 148,243,251,252,253,254,255,259  
kecepatan sesaat 103,148  
kecepatan sudut 144,150,155,164,170,175,176,  
178,181,182,188,189,190,302  
kelajuan 43,51,108,109,115,120,121,122,124,125,127,  
129,130,131,133,138,139,147,148,149,150,152,162,  
167,179,180,224,228,229,230,231,251,253,254,258,  
262,263,297,300,302,303,312  
kerapatan 199,200,202,203,206,208,211,212,213,214,  
214,215,216,222,226,235,237,243,246,250,253,256,258,  
266,300,303  
kesetimbangan 100,151,152,154,182,183,184,256,  
257,259  
koefisien restitusi 117,132,133,135,139,140  
konstanta pegas 91,94,146,151,238

### M

massa jenis 199,200,214,234,237,238,,240  
medan gravitasi 36,45  
melayang 145,208,209,211,212,215,216,238  
menggelinding 147,155,178,179,180,181  
mesin kalor 269,277,278,282,290,301  
modulus Bulk 201,  
momen inersia 154,164,169  
momentum 43,45,115,116,118,119,120,122,123,  
134,154,155,174,175,176,177,178,182,187,188,189,190,191,196,  
243,250,251,258  
momentum sudut 43,45,129,154,174,176

## O

osilasi 151

## P

percepatan rata-rata 147

percepatan sudut 144,150,157,170,171,172,173,181,188,190,302

percepatan tangensial 150,171

perubahan momentum 117,118,119,120,121,122,134,176,243,250

## S

siklus Carnot 269,282,284

sistem konservatif 99

sistem massa pegas 92,97,315

## T

tegangan geser 199,200

tegangan permukaan 216,315

tekanan 197,200,201,202,203,204,205,206,207,207,209,215,222,225,226,227,228,229,231,232,235,236,237,238,239,240,242,243,245,246,249,250,251,252,259,268,269,270,271,272,273,276,277,284,285,288,289,290,292,293,300,302,303,304

tekanan gauge 205,238,263

tekanan hidrostatik 215

tenggelam 208,209,210,212,213,214,215,216,218,238,240

teorema usaha energi 104

terapung 211,213,214,215,216,218,

torsi 43,45,153,154,155,156,157,158,159,160,161,170,171,172,173,176,177,181,

182,183,184,186,187,189,190,196

tumbukan 116,117,119,120,126,127,128,129,130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,140,143,243,249,250

tumbukan elastik 126,130,132,138

tumbukan lenting sempurna 127,128,135,139

tumbukan tidak lenting sempurna 128,135

## U

usaha 81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,94,95,97,99,100,101,102,104,105,106,108,109,114,146,189,256,257,269,270,271,272,273,274,275,276,277,278,279,280,281,282,285,286,287,288,289,290,291,292,293,296,301,304,310,311,313,315

## Indeks Pengarang

### A

Archimedes 145,198,208,209,213,238

### B

Bernoulli 198,225,227,228,229,230,231,234,235,236

Boyle 245,249,260

### J

James Prescott Joule 287

Joule 84,108,257,258,270,276,287,311

### K

Kelvin 246,275

Kepler 36,37,38,43,44,45,52

### N

Newton 36,39,43,45,52,83,84,119,134,154,160,170,  
172,174,187,196,200,209,237,250

### P

Pascal 198,201,207,208,238

### R

Robert Boyle 245,249

### T

Tipler 83,113,164,247,269,305

## Konstanta Tetapan Alam

Konstanta gravitasi	$G$	$6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$
Bilangan Avogadro	$NA$	$6,022 \ 137 \times 10^{23} \text{ partikel/mol}$
Konstanta Coulomb	$k=\frac{1}{4} \pi \epsilon_0$	$8,987 \ 551 \ 788 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
Konstanta gas	$R$	$8,314 \ 51 \text{ J/mol.K}$
		$1.987 \ 22 \text{ kal/mol.K}$
		$8.205 \ 78 \times 10^{-2} \text{ L.atm/mol.K}$
Kecepatan cahaya	$c$	$2,997 \ 924 \ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$
Muatan elektron	$e$	$1,602 \ 177 \times 10^{-19} \text{ C}$
Konstanta Boltzman	$k=R/NA$	$1,380 \ 658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
		$8,617 \ 177 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
Unit massa terpadu	$u$	$1,660 \ 540 \times 10^{-24} \text{ g}$
Konstanta Planck	$h$	$6,626 \ 176 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
		$4,135 \ 669 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$
Permitivitas ruang hampa	$\epsilon_0$	$8,854 \ 187 \ 817 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}$
Permeabilitas ruang hampa	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Massa elektron	$m_e$	$9,109 \ 390 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Massa proton	$m_p$	$1,672 \ 623 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa neutron	$m_n$	$1,674 \ 929 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Magneton Bohr	$mB=eh/me$	$9,274 \ 015 \times 10^{-24} \text{ J/K}$
Magneton nuklir	$mN=eh/mp$	$5,050 \ 786 \times 10^{-27} \text{ J/T}$
Konstanta Rydberg	$R_H$	$1,097 \ 373 \ 153 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$



## Kunci Jawaban

### Bab I Kinematika

- |      |       |
|------|-------|
| 1. C | 9. C  |
| 3. A | 11. E |
| 5. B | 13. E |
| 7. C | 15. A |

### Jawaban soal uraian

- a)  $v_2 < v_1$ ,  
b)  $v_2 < v_1$ ,  
c)  $v_2 < v_1$ ,  
d)  $v_2 > v_1$
- a) luas persegi panjang 0,25 m/det  
b)  $t = 1$ ;  $v = 3,5$  m/s;  $t = 2$ ,  $v = 11,5$  m/s
- a) 24 km/jam, b) -12 km/jam  
c) 0 km/jam  
d) 16 km/jam
- 66,67 km/jam
- a) 1 m/s  
b) 0,7 m/s

### Bab II Gravitasi

- |      |      |
|------|------|
| 1. E | 7. C |
| 3. B | 9. B |
| 5. B |      |

### Jawaban soal uraian

- 2,92 Au (2,92 satuan astronomi)
- $2,63 \times 10^6$  m/s
- 935 km

### Bab III Elastisitas

- |      |       |
|------|-------|
| 1. A | 9. C  |
| 3. E | 11. B |
| 5. C | 13. E |
| 7. B | 15. E |



### Jawaban soal uraian

1. 0,488 mm
3. a) 7,96 Hz,  
b) 0,126 s,  
c) 0,1 m,  
d) 5 m/s  
e) 250 m/s<sup>2</sup>  
f)  $t = 0,031$ ,  $x = 0$
5. a) 1,49 km  
b) 5,84 Hz  
c) 0,171 s

### Bab IV Energi dan Usaha

1. C
3. E
5. A
7. D
9. C

### Jawaban soal uraian

1. a) 7200 J  
b) 1800 J  
c) 28.800 J
3. a) 9 J  
b) 12 J  
c) 4,58 m/s
5. a) 0,858 m  
b) bila semua gaya konservatif maka benda akan berosilasi
7. a) 7,67 m/s  
b) 88,2 J  
c) 1/3
9.  $1,37 \times 10^6$  kW

### Bab V Momentum

1. C
3. C
5. A
7. D
9. E

### Jawaban soal uraian

1. 560 kg m/s
5. a) 6 kg m/s  
b)  $4,62 \times 10^3$  N
7. 0,625 m/s
11. 450 m/s

### Uji Kompetensi Akhir Semester Gasal

1. B
3. B
5. B
7. C
9. E
11. A
13. D
15. E

### Jawaban soal uraian

1.  $-2 \text{ m/s}^2$
5. 4,59 km
7. a) 34,7 s  
b) 1,21 km
11.  $v = 15 \text{ m/s}$  ke arah horisontal,  $a = 9,81 \text{ m/s}^2$  ke bawah
13. jarak horisontal proyektif 408 m
15.  $45 \text{ m/s}^2$
17. 29,9 putaran per menit
27. 2,62 s
29. a) 4,8 kg m/s  
b) 1.600 N  
c) 2,4 kg m/s  
d) 19,2 N

### Bab VI Dinamika Rotasi

1. B
3. D
5. D
7. B
9. B

**Jawaban soal uraian**

1. a)  $\tau = 1,5 \text{ Nm}$ ,  $\alpha = 100 \text{ rad/s}^2$   
b)  $400 \text{ rad/s}$
3.  $(6 \frac{2}{3}, 62/3)$
5. a)  $56 \text{ kgm}^2$   
b)  $28 \text{ kgm}^2$   
c)  $112 \text{ J}$
7.  $\frac{1}{4} MR^2$
9. a)  $L$  dua kalinya,  
b)  $L$  dua kalinya
11. a)  $\frac{7}{5} g \sin \theta$   
b)  $\frac{2}{7} mg \sin \theta$   
c)  $\tan \theta = \frac{7}{2} \mu_s$

**Bab VII Mekanika Fluida**

1. A
3. A
5. D
7. C
9. C

**Jawaban soal uraian**

1.  $1060 \text{ kg/m}^3$
3.  $11,1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
5.  $0,233 \text{ N/m}$

**Bab VIII Kinetika Gas**

1. C
3. C
5. E
7. B
9. A

### Jawaban soal uraian

1. 1,15 kali volume semula
3. 152 J
5.  $v_{rms} = 4,99 \times 10^5 \text{ m/s}$ ,  $K_{rata} = 2,07 \times 10^{-10} \text{ J}$

### Bab IX Termodinamika

1. A
3. C
5. A
7. B
9. B
11. E

### Jawaban soal uraian

1. 874 kH
3. a) 608 J  
b) 254 kJ
5. a)  $U_{awal} = 3,4 \text{ kJ}$   
b)  $U_{akhir} = 3,7 \text{ kJ}$ ,  $W = 200 \text{ J}$   
c)  $U_{akhir} = 3,9 \text{ kJ}$ ,  $W = 0$

### Uji Kompetensi Akhir Semester Genap

1. D
3. A
5. D
7. D
9. C
11. C
13. B
15. B
17. E
19. B

### Jawaban soal uraian

1. a)  $\frac{7}{5} g \sin \theta$   
b)  $\frac{2}{7} mg \sin \theta$

- c)  $\tan \theta = \frac{7}{2} \mu_s$
3. a)  $13,6 \text{ kgm}^2$   
b)  $7,14 \text{ N.m}$
5. a)  $552 \text{ N}$   
b)  $1,77 \text{ rad/s}^2$   
c)  $2,17 \text{ rad/s}$
7. a)  $12 \text{ m/s}$   
b)  $133 \text{ kPa}$   
c) rata-rata aliran identik di kedua bagian
9. a)  $14,7 \text{ g}$   
b)  $1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$



**ISBN 978-979-068-802-5 (nomor jilid lengkap)**  
**ISBN 978-979-068-809-4**

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

**Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp16.855,-**